



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MODERNIZACE ZKUŠEBNÍCH STANIC R-MAT

MODERNIZATION OF R-MAT TEST STATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Papaj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Lukáš Papaj
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Modernizace zkušebních stanic R–mat

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zkoušky kontaktní únavy materiálů se na Ústavu konstruování realizují na dvou starších základních typech zkušebních zařízení. V současné době je nutné provést zásadní rekonstrukci a modernizaci skupiny stanic R–mat. Tyto stanice jsou vybaveny zastaralým a nespolehlivým řízením. V návaznosti na předchozí modernizaci stanic Axmat bude provedena obdobná rekonstrukce s novým systémem řízení na základě moderního systému snímání vibrací, který bude doplněn kontrolním snímáním signálu akustické emise. Systém bude řízen technickým počítačem PLC s nově vytvořeným řídicím a vyhodnocovacím software.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce bude návrh modernizace stanic R–mat, ověření funkčnosti a zhodnocení přínosu aplikace metody akustické emise.

Díličí cíle diplomové práce:

- návrh rekonstrukce elektronického řízení stanic R–mat,
- konstrukční úprava stanic pro aplikaci snímačů akustické emise,
- návrh řídicího a vyhodnocovacího software pro řídicí počítač,
- ověření funkčnosti provedených úprav a verifikace zlepšených parametrů stanic.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika. 1. vydání, BEN - technická literatura, Praha 2006, 408 s, ISBN 978-80-7300-158-6.

BOUKHAROUBA, T., ELBOUJDAINI, M., PLUVINAGE, G.: Damage and Fracture Mechanics Failure Analysis of Engineering Materials and Structures. 1. vydání. Springer Science + Business Media B.V., Berlin 2009, 608 s., ISBN: 978-90-481-2668-2.

KOPEC, B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1. vydání, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno 2008, 571 s., ISBN 978-80-7204-591-4

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je rekonstruovat zastaralé zkušební stanice R-mat, které slouží pro zkoušky kontaktní únavy materiálu, o které je z oblasti průmyslu stále zájem. Bylo nutné nahradit původní řídicí elektroniku novým průmyslovým počítačem, aby bylo možné využívat moderní snímače a proces celé zkoušky automatizovat. Současně bylo měření doplněno o metodu akustické emise, která dokáže zaznamenat i rozvoj poškození. Proběhly konstrukční úpravy, které dovolují instalaci všech nových snímačů. Hlavní metodou pro vyhodnocení zkoušek je vibrodiagnostika, která je doplněna metodou akustické emise. Pomocí několika experimentů byly zjištěny nedostatky nového řídicího systému, navrženy některé parametry a ověřena funkčnost modernizované stanice R-mat. Podle navržených parametrů a zjištěných nedostatků byl upraven řídicí systém a vytvořen skript, který slouží pro vyhodnocení zkoušky. Na modernizovaném zařízení je i nadále možné provádět zkoušky kontaktní únavy materiálu a díky modernizaci elektroniky je možné testovat zcela nové metody vyhodnocování zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

R-mat, kontaktní únava materiálu, vibrodiagnostika, akustická emise

ABSTRACT

The aim of the thesis is to reconstruct obsolete R-mat test stations, which are used for rolling contact fatigue tests of material, which are still of interest from industry. It was necessary to replace the original control electronics with a new industrial computer to allow use modern sensors and automate the entire test process. At the same time, the measurement was supplemented by an acoustic emission method, which can also record the development of damage. Design modifications have been made that allow the installation of all new sensors. The main method for evaluating the tests is vibrodiagnostics, which is supplemented by the acoustic emission method. With the help of several experiments, the shortcomings of the new control system were identified, some parameters were designed, and the main functionality of the modernized R-mat station was verified. According to the proposed parameters and the identified shortcomings, the control system was modified, and a script was created, which is used to evaluate the test. It is still possible to perform rolling contact fatigue tests of the material on the modernized equipment, and thanks to the modernization of the electronics, it is possible to test completely new methods of test evaluation.

KEYWORDS

R-mat, rolling contact fatigue, vibrodiagnostic, acoustic emission

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAPAJ, Lukáš. Modernizace zkušebních stanic R-mat [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132860>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Pavel Mazal.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Mazalovi CSc. za odborné vedení, cenné rady a ochotu při řešení této práce. Dále Ing. Františku Vlašicovi Ph.D. za pomoc a zkušenosti s měřením a vyhodnocováním akustické emise a Ing. Zbyňku Streckerovi Ph.D. za instalaci elektroniky a rady při programování PLC.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Kontaktní únava materiálu	17
2.1.1	Stroje pro zkoušky kontaktní únavy materiálu	17
2.1.2	Způsoby vyhodnocení kontaktní únavy materiálu	20
2.2	Vibrodiagnostika	21
2.2.1	Důvody využívání	21
2.2.2	Vyhodnocování	22
2.2.3	Snímače	22
2.2.4	Kalibrace snímačů	23
2.2.5	Umístění snímačů	23
2.3	Akustická emise	24
2.3.1	Důvody využívání	25
2.3.2	Vyhodnocování	26
2.3.3	Snímače	27
2.3.4	Kalibrace snímačů	29
2.3.5	Umístění snímačů	30
2.4	Metoda rázových pulzů	31
2.4.1	Důvody využívání	31
2.4.2	Vyhodnocování	31
2.4.3	Snímače	32
2.4.4	Kalibrace snímačů	32
2.4.5	Umístění snímačů	33
2.5	Termografie	33
2.6	Popis současného stavu zkušebny kontaktní únavy	34
2.6.1	Zkušebna R-mat	34
2.6.2	Zkušební stroje R-mat	36
2.6.3	Řídicí systém R-mat	37
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	39
3.1	Analýza problému	39
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	39
3.3	Cíl práce	40
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	43

4.1	Koncepty synchronizace časové osy	43
4.1.1	Pomocí umělé události	44
4.1.2	Pomocí reálného času	44
4.1.3	Pomocí externího triggeru	45
4.1.4	Výběr vhodného konceptu	45
4.2	Umístění snímače AE	45
4.2.1	Výběr vhodného konceptu	46
4.3	Výběr vhodného vazebného média	46
4.3.1	Výběr vhodného konceptu	46
4.4	Způsoby uchycení snímače AE	47
4.4.1	Přilepení snímače	47
4.4.2	Přitlačení snímače	47
4.4.3	Pomocí permanentního magnetu	47
4.4.4	Výběr vhodného konceptu	48
4.5	Odlišení původu událostí	48
4.5.1	Pomocí dvou snímačů AE	48
4.5.2	Pomocí snímačů teploty	49
4.5.3	Pomocí frekvenční oblasti	50
4.5.4	Výběr vhodného konceptu	50
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	52
5.1	Umístění snímačů	52
5.2	Princip funkce	53
5.3	Výběr vhodného snímače AE	55
5.3.1	Princip testu	55
5.3.2	Vyhodnocení	56
5.4	Modernizace pohledových částí	57
5.4.1	Barevný nástřik	57
5.4.2	Výměna rozvodů maziva	58
5.4.3	Krytování stanice	58
5.5	Řídící software	60
5.5.1	Diagnostika vadného ložiska	60
5.5.2	Úpravy ovládacího panelu	61
5.6	Vyhodnocování	62
5.6.1	Importování dat	62
5.6.2	Zpracování dat	63
5.6.3	Interpretace výsledků	63

5.7	Ověření funkčnosti	64
5.7.1	Dlouhodobá zkouška	64
5.7.2	Zkouška kontaktní únavy materiálu	65
5.7.3	Zkouška diagnostiky opěrných ložisek	67
5.7.4	Diagnostika přítlačných disků	68
6	DISKUZE	70
7	ZÁVĚR	74
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	77
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78
11	SEZNAM TABULEK	80
12	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

Při konstrukci nových zařízení jsou kladeny stále větší požadavky na zajištění vysoké bezpečnosti a současně na úsporu financí, proto jsou zařízení navrhována na hranici svých možností. Pro splnění těchto požadavků je nezbytné umět přesně určovat bezpečné hranice materiálů. Ve většině strojů a strojních zařízení jsou součástky, které mají vzájemný kontakt a pracují cyklicky, jako jsou například ložiska, vačky, ozubená kola, nebo kontakt kola a kolejnice. Nejen u jmenovaných součástí dochází právě ke kontaktní únavě materiálu. Únava se projevuje zejména pittingem, nebo někdy také spallingem. Při těchto projevech se z povrchů součástí vydroluje nebo odlupuje materiál, tím dochází k porušení kontaktní plochy a v krátkém čase dojde k poškození celé součásti. Proto je žádoucí umět přesně určit, kdy k tomuto porušení dojde a předvídat jej.

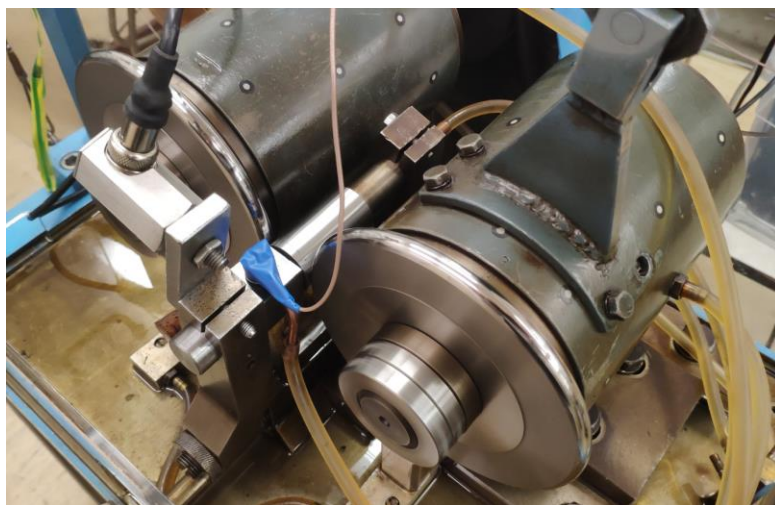
Zkoumání kontaktní únavy materiálů probíhá v ústavu konstruování FSI, VUT v Brně již dlouhou řadu let. Testování probíhá na dvou typech jednoúčelových strojů. Zkouší se zde kontaktní únava materiálů v kontaktech, které jsou zatěžovány axiální silou (na strojích Axmat) a radiální silou (stroje R-mat). Na strojích dochází k postupným modernizacím. Minulý rok byly zcela rekonstruovány stroje Axmat a teď je žádáno, aby byla také provedena rekonstrukce na strojích typu R-mat.

Zkoušky na strojích R-mat jsou realizovány na zkušebním tělese, které je vloženo mezi dvěma disky, jeden z disků je hnán a druhý je zatěžován, aby vyvolával v kontaktu potřebné napětí. Vzniklé vady na zkušebním tělese jsou doprovázeny vibracemi a zvukovou emisí. Je důležité zachytit vznik prvních vibrací, aby mohla být zkouška ukončena a odečten počet proběhlých cyklů.

Při průběžné rekonstrukci byl jeden ze zkušebních strojů R-mat modernizován a provizorně osazen snímačem akustické emise. Při srovnání naměřených výsledků se ukázalo, že určení vznikajícího pittingu je přesnější pomocí akustické emise. Současný stav zkušební stanice disponuje citlivým analogovým nastavováním prahové hodnoty pro ukončení zkoušky. Toto seřízení je velice závislé na zkušenostech obsluhy. Při nesprávném seřízení proběhne zkouška nekorektně a je nutné ji opakovat, tím se zvyšuje potřebný čas pro měření.

Na zkušební stanici R-mat bude nainstalován PLC kontrolér a úkolem této práce je zejména úprava a odladění nového řídicího systému. Je žádáno při vyhodnocování kombinovat měřená data ze snímače zrychlení a snímače akustické emise. PLC kontrolér bude dovolovat ukládání celého průběhu zkoušky pro následnou rekonstrukci a vyhodnocení, a taktéž umožní vzdálený přístup přes internet, aby mohly být stroje kontrolovány vzdáleně.

Tato modernizace zvýší přesnost měření radiálních zkoušek kontaktní únavy, což zajistí přesnější predikci vzniku únavových vad, jako je pitting a spalling. Lepší predikce napomůže při výpočtech časové životnosti součástí, například u ložisek.



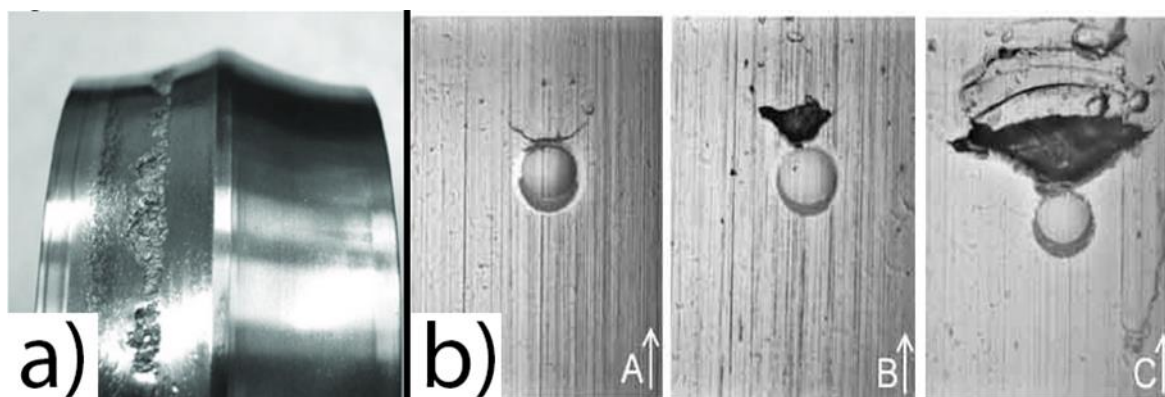
Obr. 1-1 Původní zkušební stroj R-mat s osazeným snímačem akustické emise

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Kontaktní únava materiálu

Kontaktní únava (anglicky Rolling Contact Fatigue – RCF) neboli únavové opotřebení nastává tehdy, pokud dochází k cyklickému namáhání kontaktních ploch dvou součástí. V kontaktech většinou nastává valení, které je doprovázeno tlakovým a smykovým napětím v kontaktních površích. Největší koncentrace napětí je pod povrchem a jedná se zejména o Hertzův tlak. Nejčastěji se jedná o nekonformně zakřivené povrchy, které jsou například ve valivých ložiscích, ozubených kolech, nebo typickým problémem je taktéž kontakt kola a kolejnice [1].

Opotřebení vzniká kumulací vad v povrchové vrstvě, začínají vznikat mikrotrhliny, které se působícím střídavým napětím stále zvětšují, dokud nedojde k vydrolení části funkční plochy. Pokud na povrchu vznikají jamky kruhového charakteru, jedná se o pitting (obr. 2-1a), pokud se začíná odlupovat tenká tvrzená vrstva, dochází ke spallingu (obr. 2-1b) [2]. Tyto typy opotřebení mohou vést až k úplnému selhání součásti, může nastat také únavový lom [1].

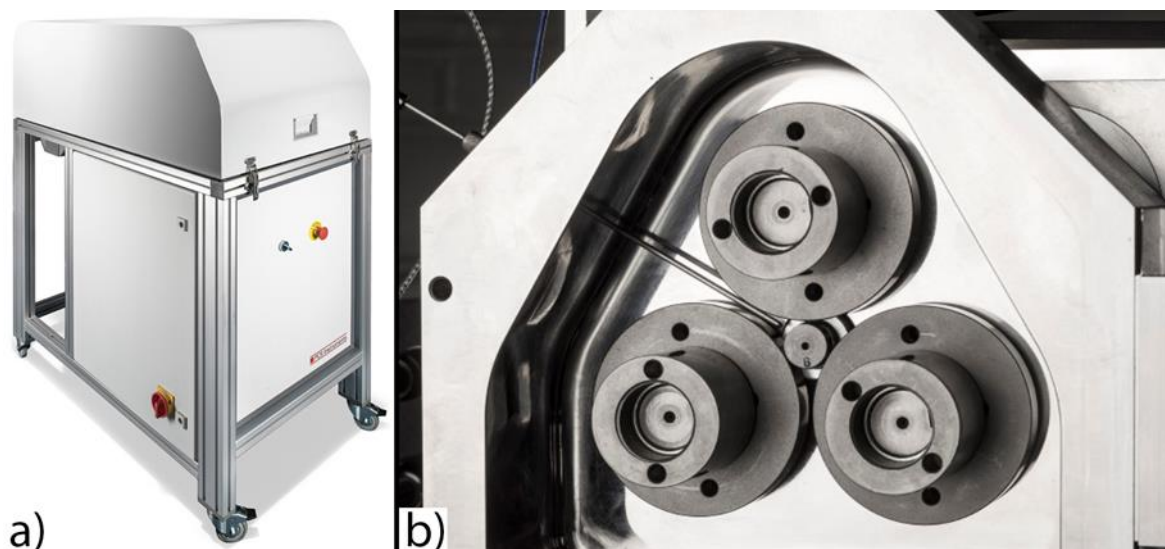


Obr. 2-1 a) pitting na vnitřním kroužku radiálního ložiska [27]; b) postupně se rozvíjející spalling [28]

2.1.1 Stroje pro zkoušky kontaktní únavy materiálu

Zkoušky kontaktní únavy se zejména dělí dle způsobu zatěžování zkoumaného vzorku, na zatěžování pomocí přitlačných disků a zatěžování pomocí valivých elementů (kuliček). Přitlačné disky působí na zkušební vzorek pouze radiální silou, přičemž valivé elementy mohou na vzorek působit radiální i axiální silou. Pro každý způsob zatěžování musí být zkušební stroje specificky zkonstruován, proto jsou tyto stroje vždy jednoúčelové a slouží pouze pro jeden typ zatěžování.

Firma PCS Instruments komerčně nabízí kompaktní stroj MPR (viz. Obr. 2-2a) [3] pro zkoušky zatěžující zkušební vzorek radiální silou. Jedná se o moderní, počítačem řízené zkušební zařízení, které má množství snímačů. Stroj dokáže vyhřívat a sledovat teplotu maziva, teplotu zkušební vzorku pomocí bezdotykového teplotního čidla, nastavovat rychlost jednotlivých disků (pro možnou simulaci skluzu v kontaktu) a měřit přítláčnou sílu pomocí tenzometru [3]. Síla je vyvozována mechanicky pomocí závitů šroubu přes pákový převod, tudíž je možné sílu měnit plynule [3]. Mazání zatěžovaného kontaktu je realizováno broděním obou spodních kotoučů v olejové vaně. Vyhodnocování kontaktní únavy na tomto



Obr. 2-2 a) stroj MPR [3]; b) uložení zkušební vzorku mezi třemi válci ve stroji MPR [3]

stroji probíhá pomocí piezoelektrického akcelerometru, který zaznamenává vibrace. Umístění akcelerometrů není z dostupných informací známé, nejspíše se jedná o interní informace firmy, ale z fotografií je pravděpodobné, že se nacházejí až za krytováním olejové vany, tedy na ložiskových pouzdrech držících zkušební vzorek. Překročení zadané hranice vibrací ukončuje zkoušku [3]. Podrobnější informace o tomto stroji výrobce neposkytuje.

Zajímavým prvkem na testovacím stroji MPR je to, že zkušební těleso je umístěno mezi třemi disky, jak jde vidět na Obr. 2-2b. Výrobce uvádí, že tato konfigurace způsobuje na zkušebním tělese větší počet zatěžovaných cyklů, což výrazně zrychlí průběh testu [3]. Při běžné rychlosti testu 3,5 m/s je zkušební těleso vystaveno zhruba jednomu milionu kontaktních cyklů za hodinu [3].

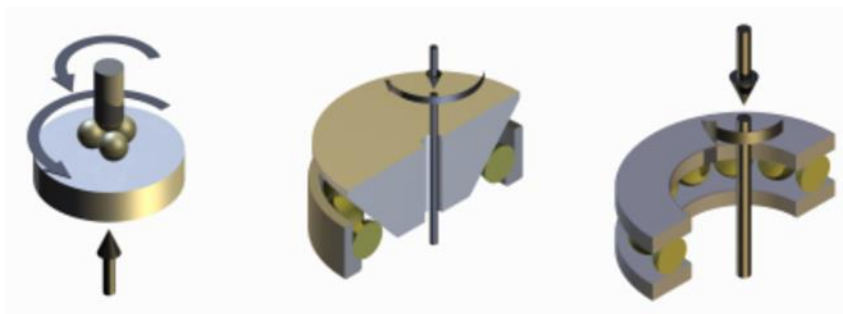
Anglická výzkumná laboratoř Phoenix Tribology Ltd [4] provádí zkoušení kontaktní únavy materiálu na pěti typech strojů. Čtyři stroje využívají k zatěžování zkušební vzorku valivé elementy a pouze jeden stroj, s interním označením RFC 3 (viz. Obr. 2-3) zatěžuje zkušební vzorek pomocí přitlačných disků [5].



Obr. 2-3 Zkušební stroj RCF 3 [4]

Stroj RCF 3 pracuje na podobném principu jako předchozí stroj MPR, kontaktní únavu materiálu je vyhodnocována stejným způsobem, a to pomocí vznikajících vibrací. Dále stroj umožňuje měřit reálné otáčky zatěžujících disků (z důvodu měření skluzu), zátěžnou sílu, která je zde vyvozována pneumaticky, teplotu maziva a kontaktu, a také elektrický odpor v kontaktu [4]. Měření el. odporu v kontaktu není dále specifikováno a jde se jen domnívat, že se jedná o experimentální měření. Dále je upozorňováno, že se pro uložení zkušební vzorku využívá valivých ložisek s hlubokou drážkou, která se mění při každé zkoušce [4]. Zkouška je prováděna za podmínek elastohydrodynamického mazání s dobře filtrovaným přívodem maziva. Je podotknuto, že nefiltrované mazivo může způsobovat adhezivní, abrazivní nebo oxidační poškození [4].

Zástupcem zkušebního stroje, který využívá pro zatěžování zkušební vzorku valivé elementy je například stroj s označením RCF 2 [5]. Toto zkušební zařízení zatěžuje zkušební vzorek zejména axiální silou, jak znázorňuje Obr. 2-4.



Obr. 2-4 Schéma uložení zkušebních vzorků ve stroji RCF 2 [5]

Na zkušební stroj RCF 2 je možné namontovat různé nástavce (viz. Obr.2-4), které zajišťují různé konfigurace zkušebních vzorků a zátěžných elementů, zároveň dokážou simulovat rozdílné typy zatížení, maximální zatížení zkušebních vzorků je 40 kN [5]. Podrobné informace o použitých snímačích a metodách vyhodnocování nejsou zmíněny.

Dalším příkladem je zkušební stroj v laboratořích Indian Institute of Technology Palakkad (Obr. 2-5) [6], který vyhodnocuje kontaktní únavu materiálu opět na stejném principu jako dříve zmíněné stroje, pomocí překročení zvolené úrovně vibrací. Zatížení v tomto stroji je realizováno pneumaticky a jde vyvodit zatížení až 450 kg. Není specifikováno, zda toto zatížení je vyvozováno přímo na zkoumaný kontakt nebo je pákově převodováno. Otáčky zátěžných disků mohou být až 24 000 ot/min [6] ale není jasné, jak velké jsou zátěžné disky a zkušební vzorek, proto není možné odvodit rychlost v kontaktu.



Obr. 2-5 Zkušební stroj technologické instituce v Indii [6]

Sortiment strojů, které dokážou měřit kontaktní únavu materiálu je malý, zejména to jsou stroje, které si zkušební laboratoře samy zkonstruovaly. Není k nim publikována technická dokumentace, která by upřesnila celou řadu parametrů. Nejspíše se jedná o interní zkušenosti jednotlivých firem.

Výstupem ze zkoušek kontaktní únavy materiálu je zejména počet cyklů, dokud se na zkušebním vzorku nezačaly projevovat první povrchové vady (např. pitting). Další parametry lze pouze odhadovat na základě použitých snímačů. Je to teplota, při které zkouška probíhala, kontaktní tlak, čas zkoušky a skluz.

2.1.2 Způsoby vyhodnocení kontaktní únavy materiálu

Kontaktní únava se projevuje na povrchu součásti, proto jí jde velice snadno zjišťovat zejména nedestruktivními zkouškami [7]. Nejjednodušší způsob pro zjišťování povrchových trhlin je například provedení kapilární zkoušky, některé typy vad jde dokonce vidět pouhým okem. Dále je možné využívat jiné, například optické metody.

Tyto metody jsou vhodné pro odhalování únavového opotřebení na demontovaných součástech [7]. Pro určování vznikající kontaktní únavy při testování je nutné využít jiné metody, které monitorují zkoumaný kontakt nepřetržitě, takzvaná on-line diagnostika. V původním stavu se využíval piezoelektrický senzor zrychlení pro zachytávání úrovně vibrační a na jedné zkušební stanici byl provizorně nainstalován také senzor akustické emise.

Dalšími způsoby pro hodnocení kontaktní únavy by mohla být například termografie, metoda SPM, ultrazvuk, elektrický odpor a další [7]. Tyto metody v tuto dobu nejsou podloženy žádnými relevantními zdroji, které by doporučovaly jejich využívání pro měření kontaktní únavy materiálu. Je pravděpodobné, že v budoucnu vyplynou i jiné metody, které budou pro tyto zkoušky vhodné.

2.2 Vibrodiagnostika

Nejrozšířenější metoda pro vyhodnocování stavu strojů je zejména vibrodiagnostika. Ve všech strojích existují pohybující se součásti, které při svém provozu budí vibrace. Při optimálním stavu stroje by měly být vibrace minimální a se zhoršujícím se technickým stavem (opotřebením) se vibrace ve stroji zvyšují.

Stávající zkušebna kontaktní únavy byla zkonstruována tak, že pro svou funkci využívá senzory zrychlení, které měří vibrace vznikající na odvalujícím se zkušebním tělese. Pro vyhodnocení vzniku vad se využívá pouze aktuální úroveň vibrací, nikoliv časová historie. Tato metoda snímání vzniku kontaktní únavy funguje již řadu let, a proto by bylo dobré ji zachovat v měřících strojích s využitím časové historie, kterou rekonstrukce bude dovolovat.

2.2.1 Důvody využívání

Vibrodiagnostika je jednou z nejrozšířenějších diagnostických metod, která se využívá již řadu let díky své jednoduchosti a rozdílnosti využívání. Je možné s ní diagnostikovat vznikající poruchy na strojích. Existují normy (např. ČSN ISO 20816-1), které dělí celkové vibrace stroje do několika kategorií a tím určují jeho aktuální stav [7]. Tímto se stává vibrodiagnostika taktéž lehce vyhodnotitelnou a vhodnou pro praktické využívání.

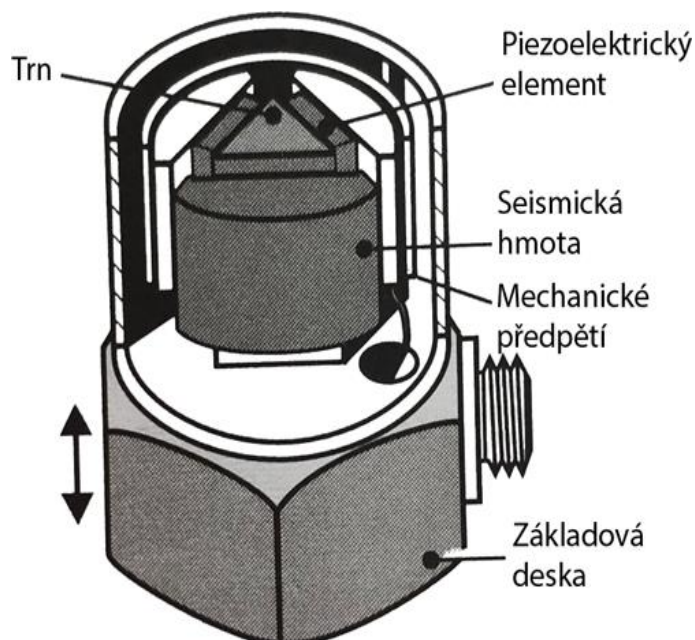
2.2.2 Vyhodnocování

Je možné postupně zaznamenávat chod stroje, čím vzniká takzvaná „časová historie“ [7]. Následně se zpracovává zejména trend signálu, který může být upraven statistickými výpočty, aby se zamezilo náhodným složkám [7]. Z vyhodnoceného signálu jde následně určit zbývající životnost stroje. S výhodou jde využít taktéž frekvenční analýza signálu FFT (Fast Fourier Transform), která zobrazí frekvence s největším zastoupením. Dle těchto frekvencí jde přímo lokalizovat součásti, které jsou na konci své životnosti [7].

Vyhodnocování u zkoušek kontaktní únavy je realizováno pomocí sledování rychlosti vibrací. Překročení nastavené hodnoty signalizuje vznik kontaktní únavy na zkušebním vzorku.

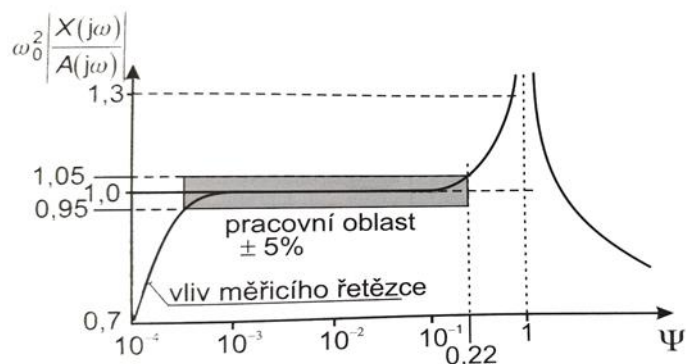
2.2.3 Snímače

Pro měření vibrací, respektive rychlosti existují absolutní senzory rychlosti. Dříve se využívaly senzory, které měřily rychlost, jejich citlivost a frekvenční rozsah byl malý, proto jsou dnes nahrazovány akcelerometry, které mají lepší frekvenční charakteristiky a jsou cenově taktéž dostupné [7]. Pro zjištění rychlosti je nutná integrace, případně se vyrábějí akcelerometry s již zabudovaným integračním členem [7]. Vyrábí se mnoho druhů akcelerometrů, nejběžnějšími jsou piezoelektrické, které existují ve více variantách. Nejrozšířenější variantou je piezoelektrický akcelerometr s DELTA uspořádáním (viz. Obr. 2-6), ve kterém se generuje náboj pomocí stříhové deformace [7].



Obr. 2-6 Piezoelektrický snímač s uspořádáním DELTA [7]

Typickou charakteristikou snímače je jeho amplitudová frekvenční charakteristika (viz. Obr. 2-7), která určuje pracovní oblast daného snímače. Platí, že čím je snímač těžší, tím je jeho citlivost vyšší a zároveň nižší jeho frekvenční rozsah (těžší snímač má nižší rezonanční frekvenci) [7]. Na frekvenční rozsah snímače má taktéž zásadní vliv jeho montáž. Nejširší frekvenční rozsah má montáž pomocí zavrtaného šroubu [7].



Obr. 2-7 Amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrického akcelerometru [7]

2.2.4 Kalibrace snímačů

Kalibraci relativních snímačů zrychlení provádí zejména výrobce. Případně jde kalibraci taktéž provést manuálně na zařízení (nazývané „Shaker“), ve kterém elektromagnet zvedá kuličku, která poté volně padá působením tíhového zrychlení. Tímto způsobem se piezoelektrický akcelerometr zkalibruje na velikost tíhového zrychlení [7].

Ve vibrodiagnostice není kalibrace zcela nutná, provádí se z toho důvodu, aby se ověřila funkčnost snímačů a nastavila se správně měřicí rozsah. Není nezbytné přiřazovat měřenému napětí správnou velikost zrychlení.

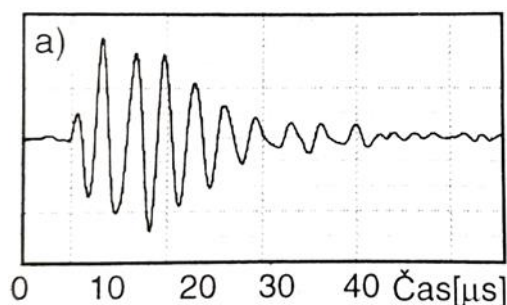
2.2.5 Umístění snímačů

Je důležité rozlišovat, zda chceme diagnostikovat celý stroj, nebo konkrétní strojní součást. Při diagnostice celého stroje se snímače umísťují na rám a měří se vibrace celého stroje jako celku [7]. Pokud je žádáno (častější varianta) diagnostikovat pouze některá strojní zařízení (nejčastěji ložiska), tak se snímač umísťuje do těsné blízkosti zkoumané součásti [7]. V případě ložisek se snímače umísťují přímo na ložisková pouzdra, aby byl přenos vibrací z ložiska maximální. Pokud není možné umístit snímač do těsné blízkosti zkoumané součásti, například z důvodu krytování nebo neobvyklých provozních podmínek, tak se využívá vlnodů, které jsou připevněny do těsné blízkosti součásti a přenášejí vibrace až k snímači [7].

Montáž snímačů může být různorodá, je ovšem přímo závislá na frekvenčním rozsahu měření snímače [7]. Nejlepšího frekvenčního rozsahu dosahuje montáž pomocí zavrtaného šroubu, což ale není vždy možné realizovat, nebo se může snímač ke zkoumanému objektu přilepit lepidlem nebo včelím voskem [7].

2.3 Akustická emise

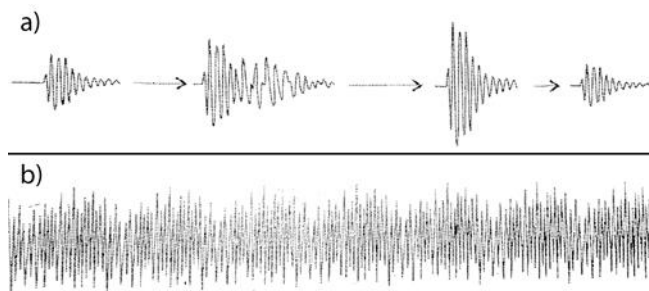
Akustická emise (AE) je jednou z moderních metod nedestruktivních zkoušek materiálů. Obvykle vzniká uvolňováním akumulované energie ve vnitřní struktuře materiálu vlivem působení vnějšího napětí. Pomocí posuvů dislokací dochází k transformaci na mechanický napěťový pulz, který se materiálem šíří jako elastická napěťová vlna, která je snímána snímači AE [7]. Dalším způsobem, jak může AE vznikat, jsou například kavitační procesy, turbulence při úniku kapalin z potrubí nebo tlakových nádob, může vzniknout také pouhým poklepáním [7].



Obr. 2-8 Odezva signálu AE na hit [8]

Zdroje AE jsou typicky krátké dynamické rázy, které se vyvolávají například šířením aktivních trhlin při zatížení. Z tohoto plyne, že metodu AE je možné využívat pouze tam, kde dochází k stálému vzniku zdrojů AE, například šíření trhlin v materiálu. Ve výstupním signálu se jednotlivé rázy projevují jako takzvané „hity“ [8]. Dle těchto hitů (viz Obr. 2-8) se následně signál dělí na nespojitý (praskavý či impulzní) a spojitý. Pokud následují jednotlivé hity za sebou, jsou charakteristické svou délkou (časem) a amplitudou, jedná se o nespojitý signál, který je na Obr. 2-9a. Tento typ signálu je charakteristický pro vznik a šíření trhlin nebo korozní působení. V signálu spojitém se jednotlivé hity prolínají, jak je zřejmé z Obr. 2-9b. Amplituda spojitého signálu AE v čase obvykle neklesá pod určitou úroveň. Signál se objevuje například při sledování netěsností tlakových nádob.

Vlny AE se mohou šířit v materiálu různými směry, například příčně, podélně, povrchově, případně jinak. Každý druh vln se šíří odlišnou rychlostí [7]. Existují vztahy, pomocí kterých lze konkrétní rychlost šíření vypočítat. Tyto vztahy závisí zejména na prostředí, ve kterém se vlna šíří, a na druhu šíření vlny. Rychlosti šíření napěťových vln jsou důležité pro lokalizování vad povrchových i podpovrchových [7]. Při lokalizaci místa defektu je nutné využívat většího počtu snímačů AE, aby bylo místo přesně lokalizováno. Při využití AE za účelem odhalení vzniku kontaktních povrchových vad, je zbytečné využívat více senzorů.



Obr. 2-9 a) praskavý signál AE - časově výrazně oddělené hity AE [8];
b) spojitý signál AE - signál hitů se sčítá/superponuje [8]

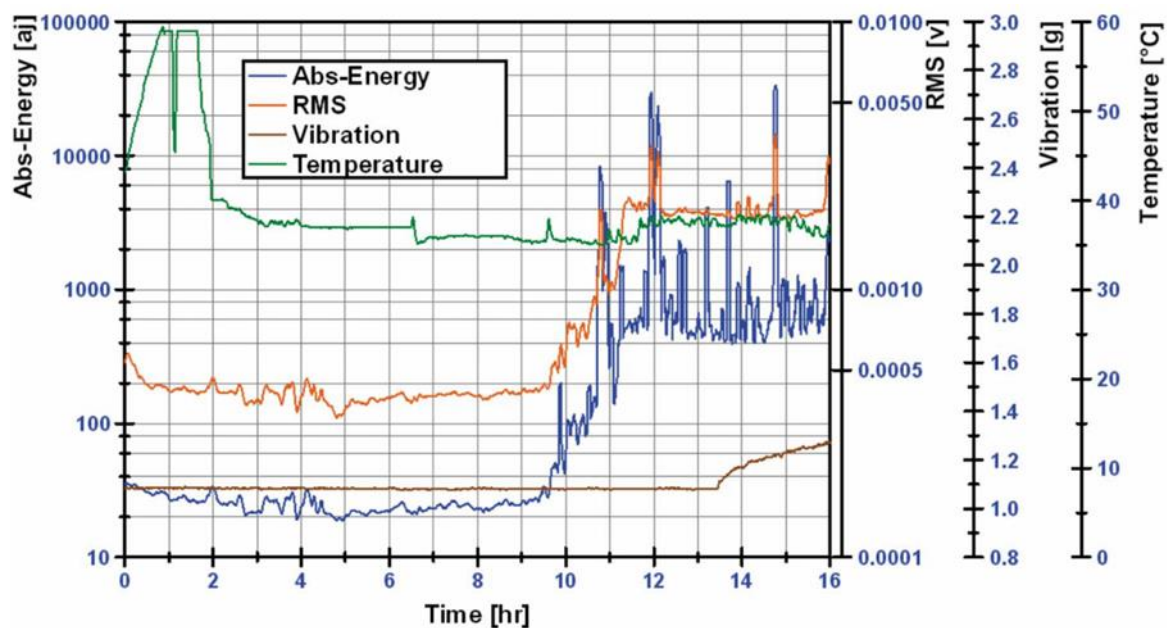
Typické využití AE v technické diagnostice je pro detekci a lokalizaci vznikajících a šířících se mikrotrhlin ve strojních součástech. Mimo to se AE hojně využívá ke zkouškám tlakového potrubí a tlakových nádob, protože efektivně identifikuje unikající kapalinu. Využití této metody je rovněž při zkouškách kontaktní únavy, kde se s výhodou využívá kontinuálního (on-line) monitorování objektu.

Jedním z cílů renovace zkušební stanice je zvýšení přesnosti při měření. Proto je žádoucí při renovaci osadit všechny zkušební stroje také senzorem akustické emise a implementovat tuto možnost také do vyhodnocovacího softwaru.

2.3.1 Důvody využívání

Existuje řada článků, například [9–11], které podotýkají, že vznik kontaktní únavy je dříve odhalitelný právě pomocí akustické emise. V článcích se efektivnost AE porovnává s vyhodnocováním pomocí vibrodiagnostiky, která se k těmto účelům běžně využívá.

Experiment prováděn M. Elforjanem [11] srovnává metody AE, vibrodiagnostiky a termografie viz. Obr. 2-9, kde je patrné, že metoda AE odhalila vznik prvních vad jako první. Pomocí vibrodiagnostiky byla kontaktní únava odhalena až o několik hodin později, termografie nepřinesla téměř žádné výsledky. Taktéž jsou porovnávány dva parametry AE, a to efektivní hodnota signálu RMS a absolutní energie, kde se ukázalo, že oba parametry jsou citlivé právě na vznikající kontaktní únavu materiálu. Experiment byl prováděn na pomalu se točícím axiálním ložisku, tudíž měření je mírně odlišné od měření radiální kontaktní únavy na zkušebních strojích.



Obr. 2-10 Graf porovnávající akustickou emisi s vibrodiagnostikou na diagnostice axiálního ložiska [11]

Tento fakt byl dříve také testován přímo v laboratoři kontaktní únavy materiálů, která je na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Skutečně se ověřilo, že pomocí akustické emise lze dosáhnout lepší přesnosti při určování vzniku prvních vad na zkušebním tělese [12]. Ovšem náročnost vyhodnocování signálu AE je značně náročnější.

Výhoda této metody spočívá v on-line diagnostice zkoumaného objektu, kde je možné s výhodou vyhodnocovat celkový trend měřeného signálu. Při detekování vzniku kontaktní únavy na zkušebním tělese je výhodné, že není nutné přerušit zkoušku, aby byl detekován aktuální stav zkušebního tělesa. Metoda AE přispívá k rychlosti zkoušky a zejména dovoluje včasné upozornění před vznikem povrchových vad, což snižuje náklady na samotnou zkoušku [11, 13].

2.3.2 Vyhodnocování

Akustická emise vzniká například při aktivním šíření a vzniku trhlin, případně při jiných aktivních dějích. Jedná se tedy o nevratné děje, což popisuje Kaiserův efekt [7]. Z tohoto důvodu je nezbytné AE měřit a zpracovávat, pokud možno bezchybně, protože není možné měření opakovat. Při využívání metod AE pro zjišťování vzniku kontaktní únavy na povrchu materiálu není tento fakt zcela zásadní. Zdrojem AE není šíření trhliny ale ráz rotujícího disku o hranu povrchového důlku způsobeného pittingem. Díky tomuto je možné sledovat více opakujících se hitů, což zjednoduší identifikaci vznikající kontaktní únavy materiálu.

Dříve bylo zmíněno, že se signál AE dělí na nespojitý a spojitý. U každého typu signálu vyhodnocujeme jiné parametry. V nespojitém signálu vyhodnocujeme zejména jednotlivé hity. Můžeme vyhodnocovat například četnost jednotlivých hitů a překmitů přes prahovou hodnotu, maximální hodnotu signálu, dobu trvání jednotlivého hitu nebo amplitudové spektrum signálu a energii pulzu [7]. Při vyhodnocování spojitého signálu již nepracujeme s jednotlivými hity, musíme signál vyhodnocovat jako jeden celek. Vyhodnocujícími parametry jsou například efektivní hodnota RMS, která znázorňuje energii signálu, střední úroveň absolutní hodnoty signálu ASL [8]. Dále může být vyhodnocován počet překmitů signálu přes prahovou hodnotu nebo amplitudové, či frekvenční spektrum [8].

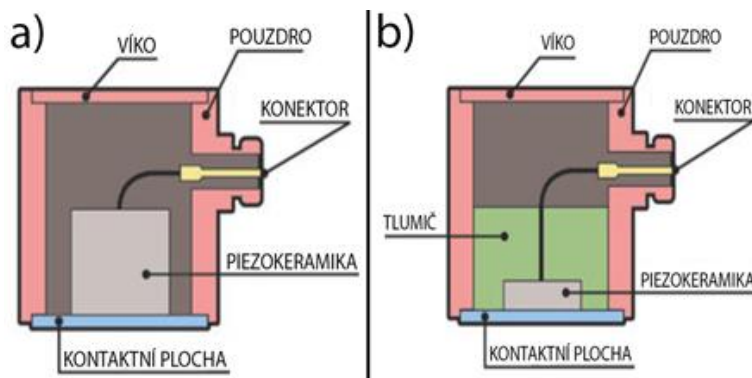
Citlivost snímačů AE je skutečně vysoká, z tohoto důvodu měřený signál obsahuje velké množství šumu. Taktéž se v signálu mohou objevovat impulzy, které nejsou přímo způsobené vnitřními nebo povrchovými vadami ve zkoumaném tělese. Z tohoto důvodu je nutné signál AE filtrovat a zkoumat pouze úzké spektrum frekvencí, které je pro nás podstatné.

Vyhodnocování kontaktní únavy ve valivých kontaktech pomocí akustické emise se zkoumá již řadu let. Výzkumy zabývající se touto problematikou přistupují k vyhodnocování kontaktní únavy různými způsoby. Jedním z nejjednodušších způsobů vyhodnocování je sledování počtů hitů za určitý čas (například za 1 minutu). Tuto metodu testoval Rahman [14]. Ukázalo se, že sledování počtu hitů za minutu je vhodný parametr pro zjištění počátku vzniku únavových vad [13]. Guo ve své práci [15] pojednává o vlivu povrchové mikrotvrdosti na kontaktní únavu. Z článku je zjevné, že parametry citlivé na vznik kontaktní únavy jsou: energie signálu, efektivní hodnota signálu (RMS) a amplituda [15]. Článek [11] určuje jako robustní parametry právě energii a RMS.

2.3.3 Snímače

Snímače převádějí mechanické deformace elastických vln AE z povrchu součásti na elektrický signál, který se následně upravuje a zpracovává. Převod na elektrický signál nejčastěji probíhá pomocí piezokeramických elementů, které při svojí deformaci „vysouvají“ elektrický náboj, tedy generují napětí [8]. Díky malému vygenerovanému napětí a vysoké citlivosti snímačů se signál předzesiluje, aby se v něm neztratila měřená informace. Z tohoto důvodu jsou předzesilovače umístěny v blízkosti snímače, případně je snímač již vybaven předzesilovačem přímo [8].

Existuje celá řada druhů snímačů AE, každý má jiné měřicí charakteristiky a taktéž pracují na odlišných způsobech snímání elastických vln na povrchu součásti. Nejčastěji jsou využívány piezoelektrické snímače, protože dosahují vysoké přesnosti. Jejich frekvenční rozsah může být v rozmezí 100 kHz až 4 MHz a jsou schopné detekovat dislokace o velikostech až 10^{-14} m [7]. Dělí se na rezonanční (Obr. 2-11a), které mají při rezonanci vyšší citlivost. Firma FujiCera u rezonančních snímačů udává rozsah rezonančních frekvencí 30 kHz – 1 MHz [16]. Druhým typem piezoelektrických snímačů jsou snímače širokopásmové (Obr. 2-11b), které mají vyšší frekvenční rozsah ale nižší citlivost. Dalším typem je snímač kapacitní, který nedosahuje tak vysoké citlivosti, je schopen snímat v rozsahu 10 kHz až 1MHz [17]. Pro měření AE existují také bezkontaktní snímače, jedná se o Elektromagneto-akustické snímače (EMAT) [7] a optické na principu laserové interferometrie [18]. Tyto metody taktéž nedosahují tak vysoké citlivosti a cena snímačů je několikanásobně vyšší.



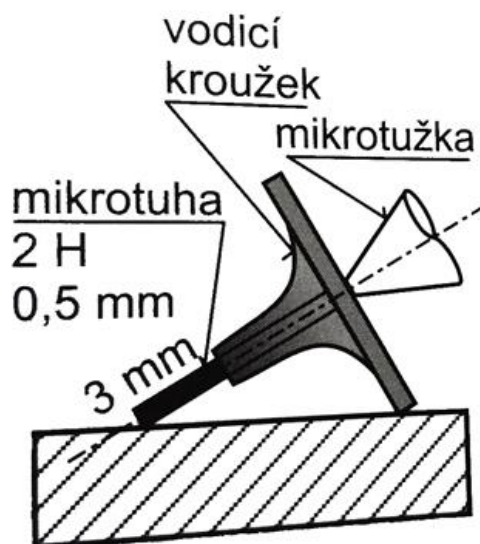
Obr. 2-11 Piezoelektrický snímač AE [16] a) rezonanční; b) širokopásmový

Pro tuto rekonstrukci je implementace vyhodnocování kontaktní únavy pomocí akustické emise pouze doplňková, proto není žádoucí pořizovat speciální snímače AE. Taktéž měření AE nebude probíhat přímo na zkušebním vzorku (na rotující součást nelze umístit snímač přímo), proto je zbytečné využívat speciální typy snímačů.

2.3.4 Kalibrace snímačů

Kalibrace je jedním z důležitých kroků při měření AE. Dělí se na absolutní (primární) a relativní (sekundární) kalibraci snímačů. Absolutní kalibrace spočívá v nalezení odezvy (napětí ve Voltech) v závislosti na absolutní velikosti buzení (výchylka v metrech). Tato metoda má své problémy, zejména že tyto veličiny jsou závislé na čase [8]. Proto je velice obtížné tuto metodu kalibrace provést, touto problematikou se zabýval například J. Keprt ve své diplomové práci [19]. Kalibrace relativní spočívá pouze v porovnání odezvy snímače na jeden neměnný typ buzení, například na buzení Pen Testu (neznáme přesný průběh buzení) [8]. Tento způsob kalibrace je vhodný k porovnávání citlivostí různých snímačů, případně ke zjištění stavu (funkčnosti) snímače samotného. Instalované snímače se tímto způsobem kalibrují, aby byla ověřena jejich bezchybná instalace a zároveň zjištěna citlivost na daný typ buzení.

V praxi se pro relativní kalibraci využívá již zmíněný Pen Test, neboli Hsu-Nielsenův zdroj, díky jeho jednoduchosti [8, 20]. Test spočívá ve zlomení definované velikosti tuhy pentelky (jak značí Obr. 2-12) na povrchu měřeného objektu, což slouží jako zdroj AE, který má velice podobný charakter reálnému zdroji, navíc je lehce opakovatelný [20]. Síla, kterou působí tuha do materiálu po zlomení skokově zmizí, tudíž generuje ostrý pulz, který vyvolá v materiálu všechny frekvence do cca desítek MHz [8]. Pomocí opakovatelného zdroje AE jde srovnávat citlivosti více snímačů, případně ověřovat vhodnost umístění jednotlivých snímačů.



Obr. 2-12 Schéma PenTestu [7]

2.3.5 Umístění snímačů

Díky velké citlivosti snímačů AE je zcela zásadní jejich umístění. Pokud to součást, konstrukce, případně provozní podmínky dovolí, tak se snímače s výhodou umísťují přímo na zkoumané těleso. V opačném případě, zejména při neobvyklých provozních podmínkách (vysoká teplota) je nutné pro umístění snímače využít takzvaný vlnovod (viz. Obr. 2-13), který elastické vlny AE převede z povrchu součásti mimo její povrch.



Obr. 2-13 Typy vlnovodů firmy Dakel [29]

Montáž snímače přímo na zkoumanou součást spočívá v přitlačení kontaktní plochy snímače na rovinnou plochu součásti pomocí akustické vazby – vazelína, olej, speciální suspenze [7, 8]. Různá vazebná média podrobně testoval Schreier ve své diplomové práci [21]. Zjistil, že nejvhodnější jsou vazebná média, která jsou určena přímo pro aplikaci v AE, velice dobře si taktéž vedl obyčejný hydratační krém na ruce [21].

Na citlivost snímače má zásadní vliv mimo akustické vazby, právě hladkost a rovinnost kontaktní plochy. V opačném případě se prudce snižuje citlivost snímače, taktéž je zcela nevhodné snímač instalovat na vrstvu barvy nebo koroze [8]. Obvykle se snímače na povrch lepí, přichycují permanentním magnetem, šroubují nebo přitlačují, aby byl zajištěn dostatečný přenos elastických vln do snímače.

Montáž snímače přes vlnovod se využívá zejména tehdy, pokud je povrch součásti horký (obvykle nad 100 °C [7]), nebo pokud není možné snímač umístit přímo na zkoumanou součást [8]. Vlnovod je nejčastěji na povrch zkoumané součásti přivařen nebo pouze přitlačen, například pomocí ruční sondy. Instalací vlnovodu se obvykle docílí pokles citlivosti vůči přímé instalaci zhruba o 14dB (10 až 20 dB) [8]. Citlivostí signálu AE přenášené pomocí vlnovodů se zabýval například Bančák ve své bakalářské práci [22], kde zjistil, že signál přenášený vlnovodem je potřeba zesílit zhruba o 15 dB, aby mohl být použit. Také zmiňuje, že využitím vlnovodu nedochází k výraznému přenosu odražených vln, tedy je signál čistší. Zároveň upozorňuje, že pro získání věrohodných výsledků, je nutné využívat akustickou vazbu mezi povrchem a snímačem [22].

Z průběhu zkoušky radiální kontaktní únavy je zřejmé, že nebude možné snímač AE umístit přímo na zkoumaný zkušební vzorek, rotace vzorku to neumožňuje. Snímač je tedy nutné umístit mimo vzorek, musí být tedy použit vlnovod v podobě ložiskového domku. Z konstrukčního uspořádání se jako vhodné místo pro snímač jeví právě domek ložiska, ve kterém je testovaný vzorek uložen, protože je nejbližší zdroji AE. Při tomto umístění bude snímač AE zachytávat zejména hity z přítomného valivého ložiska, což není žádoucí.

2.4 Metoda rázových pulzů

Neboli Shock Pulse Method (SPM) je metoda vyvinuta společností SPM [23] a je založena na principu vibrodiagnostiky. Slouží k rychlé identifikaci stavu zejména valivých ložisek. Může se také využívat pro hodnocení stavu převodovek s ozubenými zuby nebo pro jiná zařízení, kde dochází k přímému kontaktu mezi součástmi.

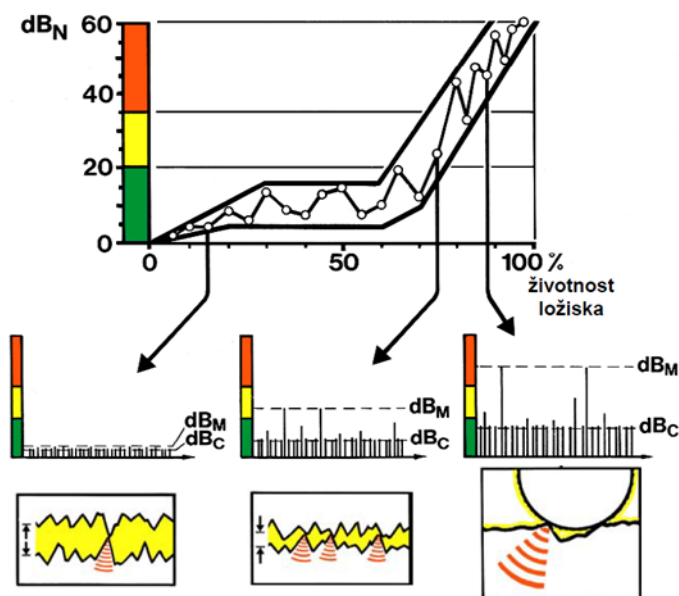
2.4.1 Důvody využívání

Metoda se využívá zejména díky její sofistikovanosti vyhodnocování a rychlosti získání výsledku o stavu ložiska. Vstupními parametry jsou průměr a otáčky hřídele a měřená data rázových pulzů [23]. SPM dokáže spolehlivě diagnostikovat stav ložiska a analyzovat stav maziva v ložisku [23]. Společnost dodává ruční analyzátory, které po zadání vstupních dat okamžitě změří stav ložiska, ale také prodává snímače, které se montují přímo do strojů. Zajišťují sběr dat pro časovou historii stroje a stávají se tak nástrojem pro online diagnostiku ložisek.

2.4.2 Vyhodnocování

Snímače měří rázové pulzy, což je rychlost mechanického nárazu valivého elementu ložiska o hranu (povrchovou vadu) na povrchu vnitřního či vnějšího kroužku [24]. Společnost udává, že existuje jednoduchý vztah mezi stavem ložiska a úrovní rázových pulzů [24]. SPM také vyvinulo algoritmus, který rozezná nahodilé rázy od těch důležitých, opakujících se [23].

Vyhodnocování probíhá zejména sledováním jednotlivých rázů. Metoda dělí tyto rázy na šum, který vzniká běžným provozem ložiska a nazývá jej kobercová hodnota (dBc) a na maximální hodnotu (dBm), což jsou výrazné rázy způsobené velkými vadami na povrchu kroužků ložisek [24]. Zvyšování kobercové hodnoty při provozu ložiska značí, že ložisko se začíná opotřebovávat. Kobercová hodnota se posuzuje vůči normalizované hodnotě (dBn), která byla získána empiricky [24].



Obr. 2-14 Zbývající životnost ložisek dle metody SPM [24]

Vstupní signál jde taktéž zpracovávat ve frekvenční oblasti. Pokud se na měřený signál použije FFT, tak je možné přesně identifikovat frekvence jednotlivých rázů. Toto má uplatnění při zkoumání, kde se rázy (vady v povrchu) přesně generují, zda na vnitřním nebo vnějším kroužku, nebo na valivých elementech.

2.4.3 Snímače

SPM vychází z principů vibrodiagnostiky a díky tomu se pro měření využívají relativní akcelerometry. Aby bylo docíleno maximálního přenosu ze snímače, pro SPM se využívají snímače rezonanční, kdy při rázech dojde k rezonanci seismické hmoty ve snímači. Společnost SPM taktéž nabízí kombinované snímače, které jsou schopny snímat vibrace a zároveň i rázové pulzy [23].

2.4.4 Kalibrace snímačů

Kalibraci snímačů provádí výrobce. Pro samotné měření není zcela zásadní, slouží zejména pro kontrolu, že snímač reaguje na rázy, ale měla by být prováděna v pravidelných intervalech.

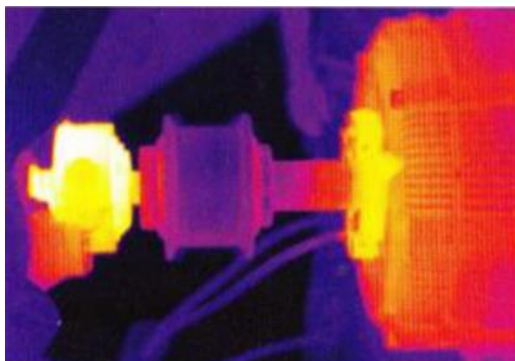
2.4.5 Umístění snímačů

Při této metodě je volba umístění snímačů zcela zásadní a rozhodující o správnosti měření. Snímač by měl být umístěn co nejbližně zkoumanému ložisku, aby nedocházelo ke ztrátě signálu. Důležité je, aby byl snímač umístěn přímo na ložiskovém pouzdru, a pokud to není z technických důvodů možné, musí být použit vlnovod jdoucí do ložiskového pouzdra [24]. Další nutnou podmínkou pro umístění je, aby byl snímač umístěn v zatížené zóně ložiska (jen tam budou vznikat rázy přechodem přes vadu na povrchu) [24]. Je vhodné použít ruční sondu, a pomocí ní vybrat nejvhodnější místo pro umístění snímače (kde je signál nejsilnější) [24].

2.5 Termografie

Termografie je jednou z nedestruktivních defektoskopických zkoušek, kterou lze vyhodnocovat kontinuálně při chodu stroje. Tato metoda je založená na vyhodnocování teplotního pole na povrchu zkušebního objektu [7]. Výsledkem jsou takzvané termogramy, které znázorňují vyvíjené nebo absorbované teplo během provozu součásti (viz Obr. 2-15). Typickým zdrojem tepla může být například zvýšený koeficient tření v zatěžovaných kontaktech, díky čemuž se uvolňuje větší množství tepla, tento kontakt je snáze identifikovatelný na termogramu.

Se vznikajícím kontaktním opotřebením přicházejí zejména povrchové vady, které zvyšují drsnost v kontaktních plochách. Tudíž v kontaktu působí stále větší třecí síly, které se přeměňují na vyzářené teplo. Pomocí termografie by bylo možné identifikovat kontaktní únavu materiálu v extrémní podobě ale nikoliv určit dobu jejího vzniku. Taktéž teplota zkušební vzorku bude velice záviset na množství přítomného maziva. Tyto důvody nasvědčují tomu, že termografie není správnou vyhodnocovací metodou pro vznik kontaktní únavy materiálů. Nicméně je to jednoduchá defektoskopická metoda, která rychlým způsobem odhalí zatěžované konstrukční uzly, které nefungují zcela správně.



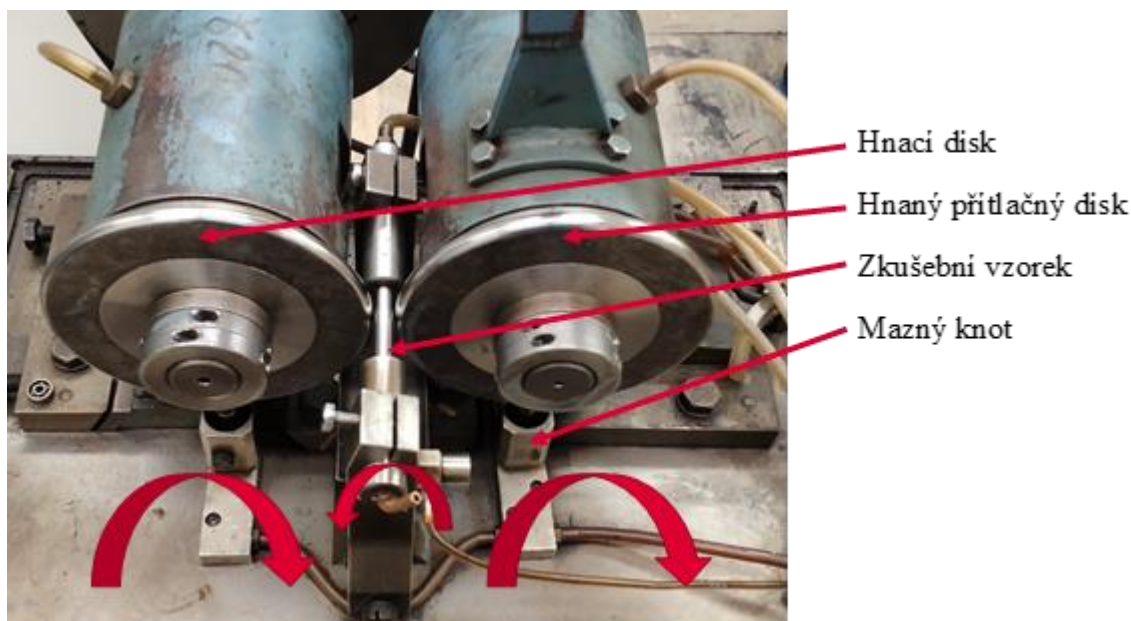
Obr. 2-15 Termogram: ložisko motoru se poměrně zahřívá [30]

2.6 Popis současného stavu zkušebny kontaktní únavy

Výzkum kontaktní únavy v laboratořích Ústavu konstruování VUT v Brně probíhá již řadu let na více typech zkušebních strojů. Kontakty zatěžovány axiální silou (jedná se například o axiální ložiska) jsou testovány na zkušebních strojích Axmat a kontakty zatíženy radiální silou jsou testovány na zkušebních strojích R-mat. Stroje R-mat byly postaveny kolem roku 1975 a je žádána jejich renovace za účelem zvýšení přesnosti měření. Částečná renovace proběhla v letech 2007–2008, kterou prováděl Popelka při řešení své diplomové práce [12]. V roce 2014 proběhla kompletní rekonstrukce zkušební stanice Axmat, do které byl přidán hydraulický systém zatěžování a řízení pomocí PLC kontroléru [25].

2.6.1 Zkušebna R-mat

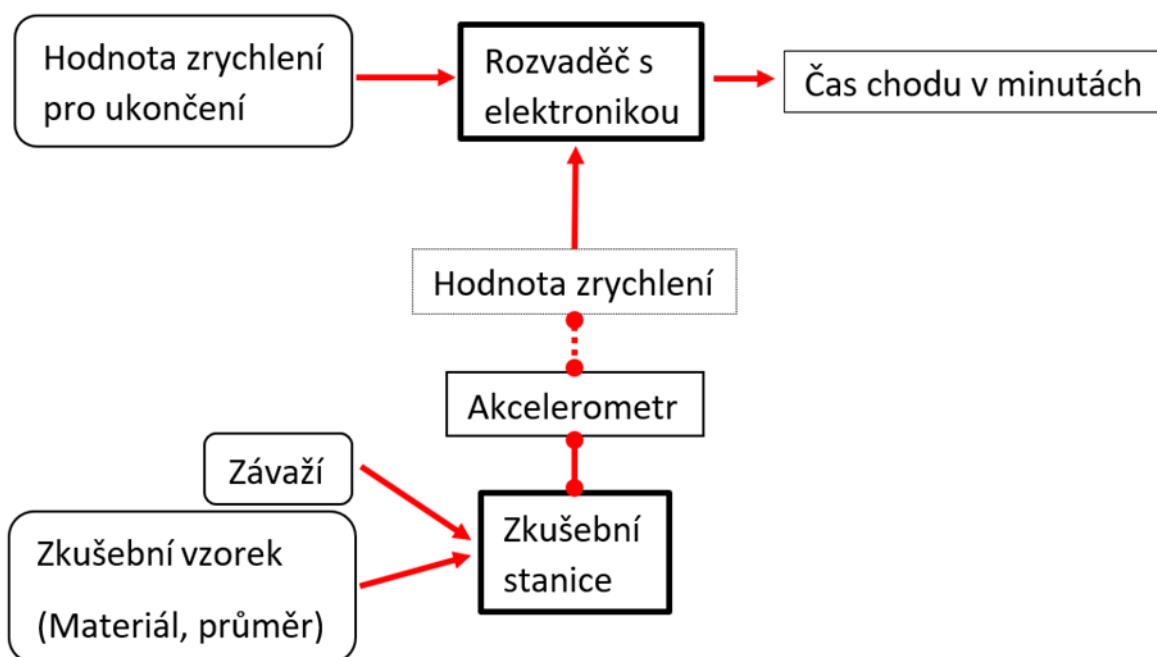
Zkušebna slouží pro radiální únavové zkoušky materiálů, kde v kontaktech dochází k valení nebo částečnému skluzu. Zkoumaný kontakt se nachází na zkušební vzorku, který je umístěn mezi dvěma disky, jak je patrné z Obr. 2-16. Jeden z disků je hnací a druhý je hnáný pomocí odvalujícího se zkušebního tělesa. Hnaný disk je zatěžován zavěšeným závažím pro vytvoření potřebného kontaktního tlaku. Při měření, ve kterém je žádán v kontaktu skluz, jsou poháněny oba disky rozdílnými otáčkami. Měření probíhá za stálé přítomnosti maziva v kontaktu pro dosažení elasto-hydrodynamického (EHD) režimu



Obr. 2-16 Zkušební vzorek mezi přitlačnými disky

mazání.

Princip funkce je patrný ze schématu na Obr. 2-17. Zkouška je realizována na zkušebním vzorku. Vstupními parametry pro zkoušku jsou závaží pro vyvození kontaktního tlaku a prahová hodnota zrychlení, která ukončuje průběh zkoušky. Při vytváření povrchových vad, jako je pitting nebo spalling dochází k vibracím zkušebního vzorku. Tyto vibrace jsou přenášeny až do držáku vzorku, na kterém je umístěn snímač zrychlení. Při překročení nastavené hodnoty zrychlení tedy dojde k zastavení stroje a ukončení zkoušky. Výstupním parametrem je čas chodu stroje. Výsledný počet cyklů, dokud se neprojeví vady povrchu vzorku, musí být dopočítán ze známých otáček disků, průměru vzorku a změřené doby zkoušky.

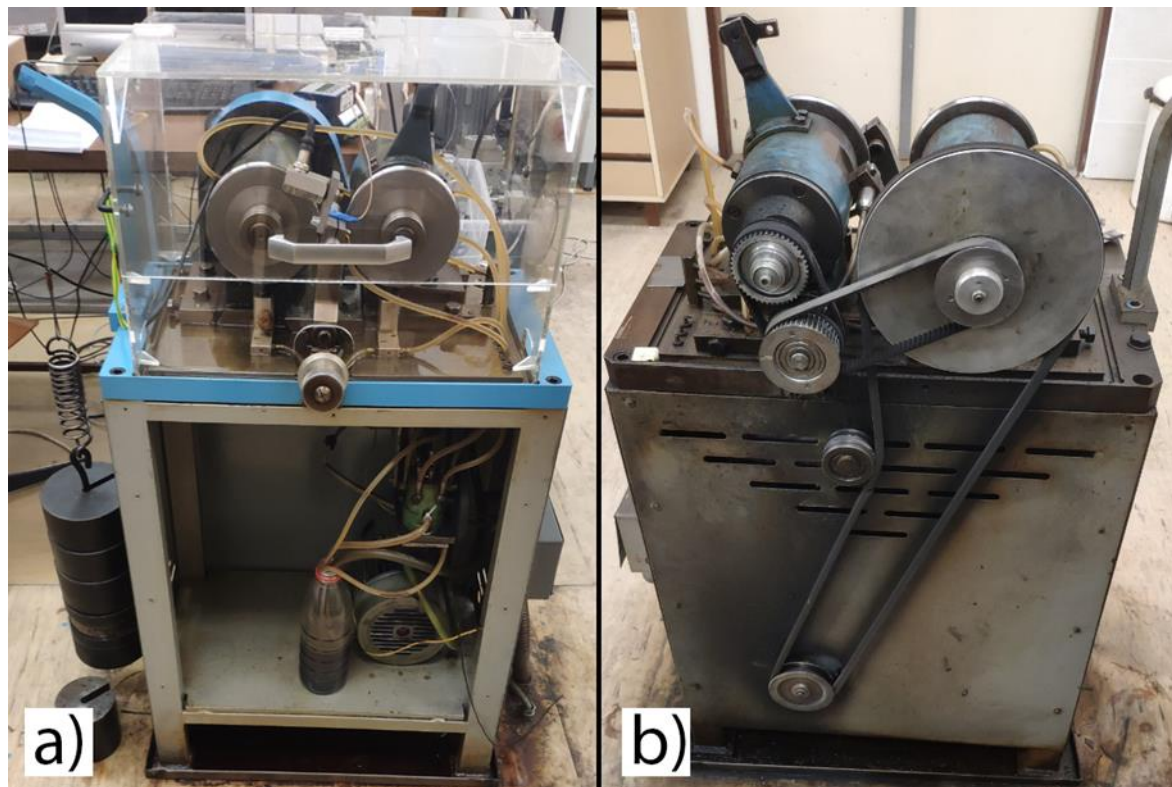


Obr. 2-17 Schéma funkce zkušebního zařízení R-mat

Nedostatkem tohoto zařízení je nastavování zmíněné hodnoty vibrací pro ukončování zkoušky. Na začátku zkoušky není možné přesně určit hodnotu vibrací, která odpovídá vzniku prvních povrchových vad na zkušebním vzorku. Tato hodnota byla nastavována obsluhou, která měla se zkouškami zkušenost. Otáčením potenciometru (Obr. 2-20b) byla nalezena hodnota vibrací nového vzorku a následně bylo otočeno ještě o zhruba čtvrt otáčky. Na tomto nepřesném nastavení byl závislý výsledek zkoušky.

2.6.2 Zkušební stroje R-mat

Stanice zkoušek radiální únavy disponuje čtyřmi zkušebními stroji. U jednoho ze strojů došlo v roce 2017 k jeho částečné rekonstrukci (Obr. 2-18a) [interní projekt ZIP - UK FSI VUT Brno]. Zejména byl navržen a vyroben nový kryt, který umožňuje lepší manipulaci se vzorkem. Také byl stroj osazen snímačem akustické emise, který doplňuje stávající metodu vyhodnocování. Zbývající zkušební stroje jsou v původním stavu, nebo po rekonstrukci z let 2007–2008. Jeden ze strojů je upraven tak, že jsou hnány oba kotouče (Obr. 2-18b), aby bylo možné simulovat čisté valení nebo skluz (20 %, 15 %, 10 %, 5 %). Tento upravovaný stroj nebude rekonstruován.



Obr. 2-18 Zkušební stroje; a) renovovaný stroj osazený senzorem AE, b) upravený stroj pro pohánění obou disků

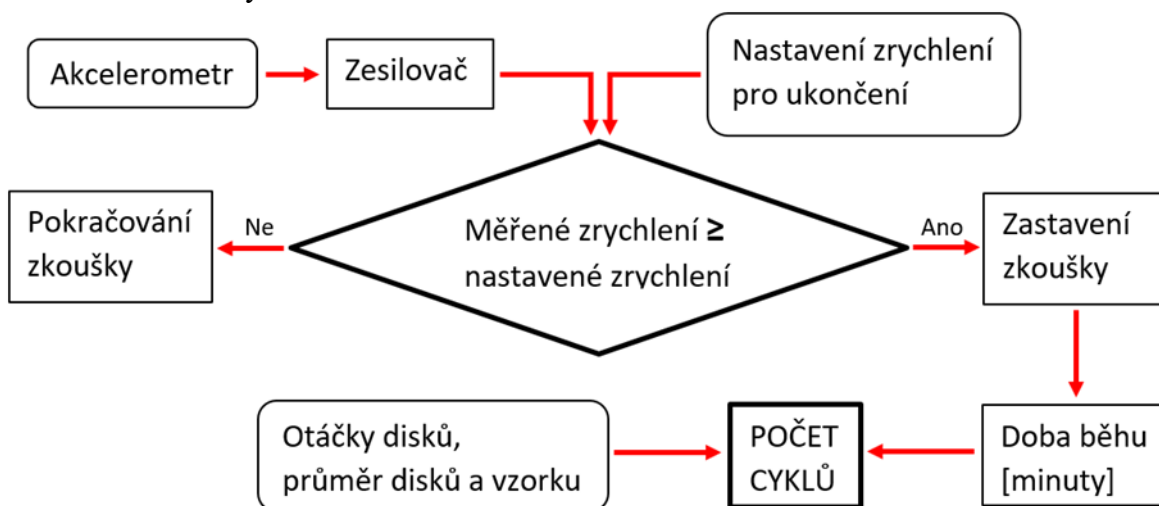
Nedílnou součástí každého zkušebního stroje je mazací okruh zajišťující kontinuální přívod maziva do zkoumaného kontaktu a také do ložisek zkušebního tělesa a disků. Mazivo je rozváděno pomocí menšího pístového čerpadla s filtrací, které je umístěno ve spodní části stroje. Zkoumaný kontakt je mazán pomocí mazacích knotů, které nanášejí mazivo na přítlačné disky. Využívá se nadbytečného množství maziva, aby bylo zajištěno EHD mazání, přebytečné mazivo stéká zpět do zásobníku s mazivem.

2.6.3 Řídicí systém R-mat

Jednou z hlavních částí celé zkušebny je rozvodová skříň (Obr. 2-20a), která slouží pro ovládání. Jedná se o opravdu jednoduchý způsob ovládání. Na skříni se nachází zapínací a vypínací tlačítko pro jednotlivé testovací stroje a taktéž časové počítadlo pro měření doby chodu (Obr. 2-20c). Na stroji se nachází taktéž měřící karta pro nastavení prahové hodnoty vibrací, která řídí vypnutí stroje, tedy ukončení zkoušky. Dále se ve skříni nachází silová elektronika pro napájení jednotlivých elektromotorů, kabelové vedení ke strojům je umístěno v zemi.

Stávající řízení je realizováno analogově, elektronicky v rozvodné skříni pomocí karet, na kterých se nastavuje hraniční hodnota vibrací (Obr. 2-20b). Překročením limitních vibrací dochází k zastavení zkušebního stroje a počítadla času. Následně je nutné z měřeného času, provozních otáček a poměru mezi zkušebním tělesem a disky dopočítat počet uběhlých cyklů. Nastavování limitních hodnot pro vypnutí stroje v současném stavu není nijak přesné a je třeba značných zkušeností obsluhy, aby bylo měření nastaveno správně. Nastavená hodnota nemá žádnou zpětnou vazbu vzhledem k poškození, které se na vzorku projevuje. V případě špatného nastavení zkoušky dojde ke špatnému vyhodnocení, respektive nastavení je přímo úměrné výsledku zkoušky.

Původní měřicí řetězec (Obr. 2-19) se skládal z akcelerometru, který generoval napětí, které bylo dále zesíleno, aby mohl být signál následně zpracováván. Dále do měřicího řetězce vstupoval vstupní parametr, a to nastavená hodnota prahového zrychlení, při jeho překročení dochází k zastavení zkoušky. Vyhodnocovací elektronika se starala o porovnávání napětí ze zesíleného signálu akcelerometru a nastaveného zrychlení (napětí). V případě, že zrychlení měřené pomocí snímače bylo větší než nastavená prahová hodnota, došlo k zastavení zkoušky.

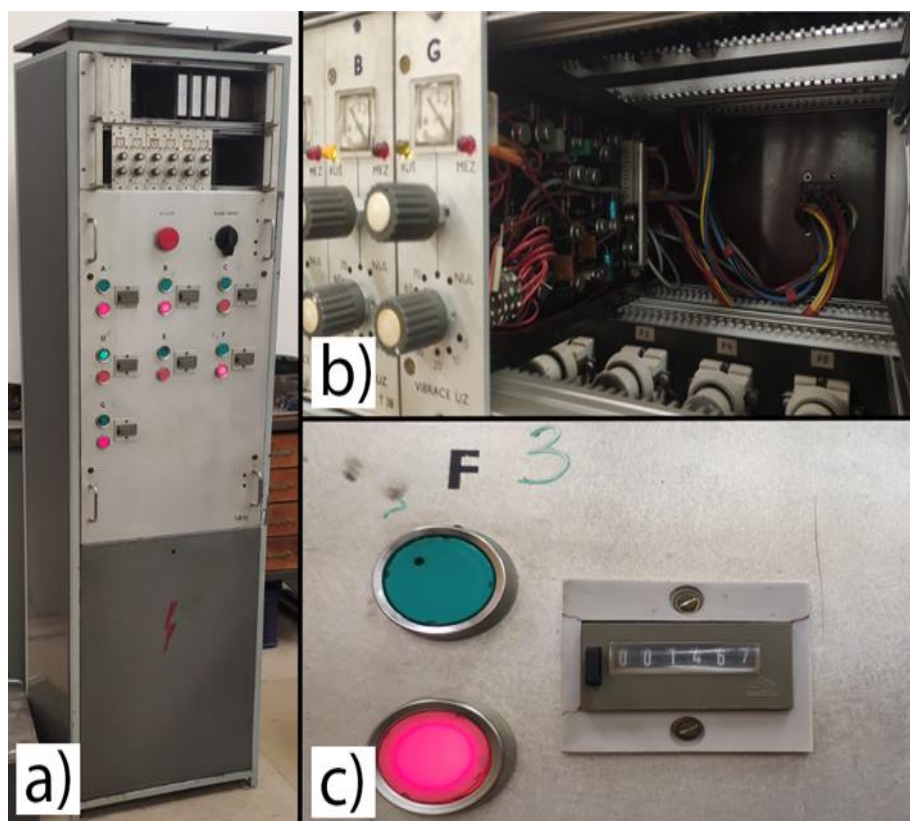


Obr. 2-19 Měřicí a vyhodnocovací řetězec původního zařízení

Jeden, z části modernizovaný stroj je ovládán taktěž zastaralým systémem. Zkoušky na něm končí po překročení limitu vznikajících vibrací. Je na něm provizorně doplněno měření pomocí AE, které běží zcela odděleně se stávajícím systémem. Signál z AE je veden do analyzátoru AE a následně se zpracovává v počítači. Vyzkoušená metoda AE dovoluje určit vznik kontaktní únavy materiálu mnohem dříve, než tomu je pomocí vibrodiagnostiky.

Řešení modernizovaného stroje je inspirováno zkušebními stroji Axmat, kde se zkoušky, od rekonstrukce strojů, taktěž vyhodnocují pomocí AE. Stroje jsou ovládány pomocí PLC, ale zkouška se následně vyhodnocuje pomocí AE s externím analyzátozem a počítačem.

Toto je primární důvod vyžadované rekonstrukce celé stanice, je žádané dosahovat vyšší přesnosti při měření, a to zejména využitím moderních technologií, kde lidský faktor měření ovlivní jen minimálně. Taktěž se počítá s využíváním více metod vyhodnocování, což aktuální stav nedovoluje. Mimo jiné se ke zkušebnímu stroji nedochovala výrobní dokumentace (zejména řídicí elektroniky), proto v případě poruchy bude velice obtížná oprava, neboť bude téměř nemožné zakoupit náhradní díly.



Obr. 2-20 a) rozvaděčová skříň; b) karty vyhodnocující vibrace; c) ovládání konkrétního zkušebního stroje

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z rešerše tohoto problému vyplývá, že i ve světě jsou kladeny stále vyšší požadavky na přesnost měření kontaktní únavy materiálu. Existuje více způsobů, jakými lze detekovat kontaktní únava, ale pro vyhodnocování těchto zkoušek se běžně využívá vibrodiagnostiky, nicméně některé zkušebních stanic, např. [9–11], doplňují tuto metodu o možnost snímání signálu AE. Snímání AE se nejčastěji vyskytuje u axiálně zatížených zkoušek kontaktní únavy materiálu. Pro zvýšení přesnosti zkušební stanice po rekonstrukci, je tedy žádoucí vyměnit stávající akcelerometry zaznamenávající vibrace za nové a osadit zkušební stroje také snímači AE. Vhodné je také měření teploty. Na modernizovaném zařízení musí být zajištěno, aby nastavení zkoušky neovlivnilo přímo výsledek zkoušky.

Taktéž je důležité renovovat samotné zkušební stroje, některé nebyly řadu let v provozu. Bude nutné zjištění jejich funkčnosti a případně je uvést do provozu. Předpokládá se, že u některých strojů bude nutná výměna některých strojních součástí, jako jsou klínové řemeny, ložiska a jiné části. Také je žádoucí stroje vyčistit od rozstříknutého oleje a vyrobit nové krytování, které zabráni rozstříku oleje. Očekává se, že krytování bude možné snímat při spuštěném testu. Je vhodné renovované stanice barevně sjednotit, aby zkušební laboratoř vypadala celistvě.

Kromě výměny dílů bude nutné navrhnout vhodný úchyt snímače AE včetně vlnovodu pro vedení elastických vln AE od zkušebního tělesa do snímače AE. Z důvodu rotujícího zkušebního tělesa není možné snímač umístit přímo na těleso. Jako vlnovod bude sloužit samotný úchyt, který bude součástí domku ložiska. Toto umístění snímače bude způsobovat problém při měření, snímač bude taktéž zachytávat zdroje AE vznikající v ložisku. Tuto komplikaci bude nejspíše nutné sledovat experimentálně a následně bude ošetřena ve vyhodnocovacím softwaru.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z rešerše vplynulo několik metod, které mohou být vhodné pro diagnostikování kontaktního poškození materiálu. A to vibrodiagnostika, akustická emise, SPM a termografie. Pro účely kontaktní únavy se nejčastěji využívá metoda vibrodiagnostiky. Pro speciální výzkumy v oblasti kontaktní únavy materiálu se metoda vibrodiagnostiky často doplňuje a zpřesňuje pomocí AE. Vyhodnocení vibrodiagnostiky není příliš komplikované, nejčastěji se zkouška ukončuje po překročení prahové hodnoty RMS zrychlení.

Rešerše vyhodnocení signálu akustické emise ukázala postupy, jak je možné signál vyhodnocovat. Parametry citlivé na vznik kontaktní únavy materiálu jsou zejména efektivní hodnota signálu, energie signálu a počet hitů za časovou jednotku. Pomocí těchto poznatků bude navržen nový vyhodnocovací systém. Vyhodnocovací software by měl být schopen sledovat více parametrů a zareagovat právě na ten, který odhalí vznik kontaktní únavy jako první. Je požadováno taktéž data signálu AE ukládat pro případné pozdější analýzy a pro výzkumy v oblasti defektoskopie pomocí AE.

Metoda termografie je vhodná pro jednoduchou a rychlou diagnostiku pouze zatížených strojních součástí. Pro určení přesného začátku vznikajících vad na zkušebním vzorku je tato metoda nedostatečná. Vyplývá to i z Obr. 2-10, kde je patrné, že počáteční zvýšení teploty v kontaktu je způsobeno záběhem a následně, kdy došlo k výskytu prvních vad se teplota téměř (zdaleka ne podstatně) nezměnila. Teplota může sloužit pro kontrolu, že zkouška neprobíhá špatným způsobem za příliš vysokých teplot. Principy termografie mohou být použity na vyhodnocování stavu použitých podpůrných ložisek.

V rešerši zmíněná metoda SPM není obvyklá pro vyhodnocování kontaktní únavy materiálu. V praxi se tato metoda využívá s výhodou pro rychlou kontrolu valivých ložisek, ale pro laboratorní účely může být tato metoda nedostatečně přesná. Díky těmto předpokladům, nebude tato metoda testována.

Z rešerše několika strojů, které se používají pro zkoušky kontaktní únavy materiálu, se ukázalo, že všechny zmíněné stroje fungují na velice podobném principu, jako stanice R-mat. Z dostupných informací vyplývá, že všechny stanice využívají pro vyhodnocení principy vibrodiagnostiky. Taktéž je patrné, že stěžejní konstrukční celky jsou řešeny velice podobně. Zkušební vzorek s malým průměrem se odvaluje mezi přitlačnými disky s několikanásobně větším průměrem. Ve všech výše zmíněných strojích je zajištěno mazání zkoumaného kontaktu, aby docházelo k EHD režimu mazání. V některých případech je zajištěna i filtrace maziva, která se zdá být opodstatněná. Bylo zjištěno, že zkušební stanice zaznamenávají teplotu při zkoušce, nicméně je dokázáno, že pomocí teploty není možné zkoušku vyhodnotit s dostatečnou přesností. Snímání teploty je vhodné pro zjištění podmínek, při kterých zkouška probíhala. Více konkrétních parametrů, které by napomohly rekonstrukci nebylo nalezeno. Všemi hlavními částmi disponuje i zkušební stanice R-mat.

3.3 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je zásadní modernizace zkušební stanice R-mat. Díky modernizaci bude možné využít moderní technologie měření a analýzy kontaktního poškození, což umožní dosažení významně přesnějšího měření. Důležité je znát celou historii zkoušky a zpětně určit, kdy začalo docházet ke vzniku povrchových vad na zkušebním tělese. Toto nebylo v původním stavu možné.

Mimo samotnou modernizaci elektroniky a mechanických částí je nutné vytvořit nový řídicí systém, který bude jednotlivé stroje ovládat a z naměřených dat vyhodnocovat vznik kontaktní únavy. Na stroji budou umístěny moderní snímače zrychlení, které budou vyhodnocovat vznikající vibrace a snímače AE, které pomocí RMS nebo energie signálu dokážou vyhodnotit vznik kontaktní únavy. Po provedení všech úprav dojde k experimentálnímu ověření přínosu AE. Předpokládá se, že akustická emise dokáže analyzovat rozvoj kontaktního poškození materiálu.

Jednotlivými dílčími cíli jsou:

- návržení a výroba úchytu pro snímač AE
- koncepce vhodného umístění snímačů AE
- výběr vhodného snímače AE
- testování vlivu opotřebovaných opěrných ložisek
- testování vlivu povrchových vad na přitlačných discích
- návržení vyhodnocovacího softwaru
- vytvoření návodu pro obsluhu zkušebních strojů R-mat

Výstup práce: funkční vzorek

Parametry zařízení:

Na rekonstruovaném zařízení bude spuštění zkoušky realizováno jedním tlačítkem, případně nastavením ukončovacího kritéria v počítači. Zkušební stanice bude schopna automaticky ukončit probíhající zkoušku na základě překročení prahové hodnoty vibrací, nebo v případě překročení prahové hodnoty měřené teploty, aby se předešlo poškození stanice. Zrekonstruované zařízení bude osazeno snímači akustické emise, aby se měření doplnilo o tyto data. Vyhodnocení zkoušky bude probíhat v softwaru, který bude kombinovat signál zpracovávaný v PLC a analyzátoru AE, a následně určí počet cyklů, dokud se nezačala projevovala kontaktní únavou materiálu. Vyhodnocování zkoušky ulehčí zejména záznam celého průběhu zkoušky, který bude archivován. Systém dokáže identifikovat některé rušivé vlivy a upozornit na ně. Systém bude zautomatizován a je vyloučen vliv obsluhy.

Tab. 1 Technické specifikace modernizovaného zařízení

Technické specifikace	Původní rozsah	Nový rozsah
Snímač	Akcelerometr	Akcelerometr, AE, teplotní čidlo
Rozsah měření teploty	-	5 – 80 °C
Ukončení zkoušky	Vibrace	Vibrace / teplota
Historie zkoušky	-	Minimálně 750 hodin
Identifikace rušivých vlivů	-	Opotřebená podpěrná ložiska, povrchové vady na discích
Nezávislost na obsluze	Závislý	Nezávislý

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Rekonstrukce zkušebních stanic R-mat by měla zajistit zvýšení přesnosti měření a zejména zjednodušení nastavování a vyhodnocování zkoušek. Jedním z cílů je zajištění průběhu zkoušek, který nebude závislý na nastavení obsluhy, jako tomu bylo v původním stavu.

Pro zajištění všech nových požadavků je nutné zcela vyměnit elektronické řízení stanic a nahradit jej novým. Nové řízení stanic R-mat bude zajišťovat průmyslové PLC. Toto PLC bude zejména ovládat chod jednotlivých stanic, ale také měřit a zpracovávat signál z akcelerometrů a teplotních čidel. Z kapitol 2 a 3 vyplynulo, že je vhodné doplnit měření vibrací ještě o měření AE. Zpracovávání signálu AE je relativně komplikované, a proto k jeho vyhodnocování bude použit analyzátor AE Zedo od firmy Dakel. Z tohoto důvodu bude nutné ve vyhodnocování zkoušky provádět synchronizaci časové osy z měřených signálů pomocí PLC a analyzátoru AE. Řešením této problematiky se bude zabývat kapitola 4.1.

Dalším problémem je umístění snímačů AE, snímač by měl být co nejbližší zkušebnímu tělesu. Nejbližší vhodné místo je tedy na domku ložiska, ve kterém je uložen zkušební vzorek. O přesné poloze snímače bude pojednávat kapitola 4.2 a o možných problémech s tímto uložením kapitola 4.3.

4.1 Koncepty synchronizace časové osy

Pro vyhodnocování zkoušek je nutné zpracovat signál z více snímačů. Signál vibrací a teploty je zpracováván pomocí PLC a signál z měření akustické emise je zpracováván v analyzátoru AE. Vyhodnocení zkoušky bude probíhat na seskupených datech v počítači. Při spojování obou signálů je nutné brát zřetel na správnou synchronizaci časové osy.

Z charakteru zkoušky kontaktní únavy, která běžně trvá desítky až stovky hodin, je zřejmé, že v průběhu měření nejsou podstatné krátkodobé, neopakující se události. Mnohem významnější je trend měřeného signálu. S ohledem na délku celé zkoušky je dostatečná i velice malá vzorkovací frekvence, v řádech 1 Hz až 0,01 Hz. Z tohoto důvodu není nutné docílit přesné synchronizace. Rozdíl v časové synchronizaci v řádech jednotek až desítek sekund je dostačující.

4.1.1 Pomocí umělé události

Jednou z možností, jak oba signály správně synchronizovat na jednu časovou osu je umělé vytvoření události na začátku měření. Na začátku zkoušky nejsou měřená data nijak zajímavá pro následné vyhodnocování, a proto je možné vytvořit umělou událost, které nijak neovlivní měření. Například základní PenTest nebo jemné poklepáním tyčkou v blízkosti umístění snímačů. Tato událost se výrazně projeví v měřeném signálu vibrací a zároveň i v signálu AE.

Na začátku zkoušky musí být proveden PenTest, který slouží pro kalibraci snímačů AE. V případě, že tento způsob kalibrace bude zachytitelný v obou signálech, není nutné vytvářet jinou umělou událost, která by sloužila pro synchronizaci.

Při vyhodnocování budou oba signály synchronizovány právě na základě této události na začátku měření. Nemusí být docíleno zcela přesné synchronizace obou signálů, ale jak vyplývá z výše uvedeného, není to velký problém. Touto metodou je možné synchronizovat signál zaznamenávající vznikající vibrace a signál akustické emise.

Vytvoření umělé události se neprojeví v signálu měřené teploty, ten není citlivý na mechanické poklepání. Tento signál bude ale dostatečně přesně synchronizován přímo v PLC spolu se signálem vznikajících vibrací.

Nevýhodou této metody je, že musí být v obou signálech správně identifikovaná umělá událost. Přičemž při nízkých vzorkovacích frekvencích nemusí být tato událost ani zaznamenána. Následně musí dojít k manuálnímu posunutí a zarovnání obou signálů.

4.1.2 Pomocí reálného času

Data ze snímačů budou zaznamenávána v PLC a analyzátoru AE připojenému k počítači. Tedy obě zařízení budou připojena k internetu a reálný čas na zařízeních je synchronizován právě pomocí internetu.

Při ukládání měřených dat bude taktéž ukládána hodnota reálného času na zařízení a následně právě tato hodnota bude sloužit pro sjednocení signálů, neboť bude tvořit jednu časovou osu.

Výhodou této metody je jednoduchost a při následném zpracování mohou být naměřená data zpracována automaticky. Nevýhodou může být to, že v případě dlouhodobého nepřipojení některého ze zařízení k internetu může dojít k samovolné změně času a pokud si toho obsluha nevšimne, nebudou měřené signály správně synchronizovány.

4.1.3 Pomocí externího triggeru

Pro spouštění měření se často využívá externího signálu, tzv. trigger. V případě, že měření bude spuštěno shodným triggerem na PLC i analyzátoru AE, tak dojde k začátku měření ve stejný čas. Při nastavení stejné vzorkovací frekvence na obou zařízeních tak dojde k téměř synchronní časové ose.

Jako řídicí signál triggeru je možné využít digitální výstup PLC a pomocí něj dosáhnout kvalitní synchronizace měření všech signálů. Nevýhodou je obtížnější instalace, nestačí k analyzátoru AE připojit pouze snímače akustické emise, ale je nutno připojit i signál triggeru a v řídicím softwaru nastavit spouštění měření právě pomocí triggeru.

4.1.4 Výběr vhodného konceptu

Nejpřesnější synchronizace všech měřených signálů by bylo dosaženo použitím triggeru pro současné spuštění všech měření. Tato varianta není nijak závislá na vzorkovací frekvenci, jen musí být na obou zařízeních nastavena stejná vzorkovací frekvence.

Pro vyhodnocování zkoušek kontaktní únavy materiálu není nutné zaznamenávat průběh zkoušky velmi podrobně, mnohem důležitější je dlouhodobý trend signálu. Z tohoto důvodu nejsou kladeny příliš velké požadavky na přesnou časovou synchronizaci měřených signálů. Jednoduchou metodou, jak synchronizovat signály relativně přesně je pomocí reálného času, což je pro tuto aplikaci dostačující.

4.2 Umístění snímače AE

Umístění akcelerometru pro snímání vibrací je zřejmé, umístěn může být jen ve směru předpokládaného kmitání, tedy rovnoběžně se zatěžující silou. Snímač akustické emise snímá elastické napět'ové vlny v materiálu. Tyto vlny se materiálem šíří všemi směry, proto může být snímač umístěn kdekoliv na povrchu, případně může být použit i vlnovod.

Snímač by měl být umístěn co nejbližší zkušebnímu tělesu. Z tohoto důvodu je nejvhodnějším místem právě ložiskový domek, který se nachází hned za zkušebním tělesem. Toto místo je nejvhodnější ale zároveň není optimální, protože uvolňované elastické napět'ové vlny musejí procházet přes více rozhraní. Napět'ová vlna, která vznikne vlivem kontaktního poškození na zkušebním vzorku, musí prostoupit mezi zkušebním vzorkem a vnitřním kroužkem ložiska, mezi vnitřním kroužkem a valivými elementy, mezi valivými elementy a vnějším kroužkem ložiska, a mezi vnějším kroužkem a ložiskovým domkem. Díky těmto čtyřem rozhraní je velice pravděpodobné, že bude měřeno právě některé z nich.

Způsoby, jakými jde umístit snímač AE na domek ložiska jsou dva, a to rovnoběžně a kolmo na zatěžující sílu. Z principu šíření napěťových vln akustické emise by mělo být jedno, jakým směrem bude snímač umístěn.

4.2.1 Výběr vhodného konceptu

Umístění snímače je jednoznačné, na ložiskovém pouzdře, které je nejbližší ke zkušebnímu vzorku. Na zvolení směru umístění snímače by nemělo záležet, proto bude snímač umístěn kolmo k zatěžující síle. Tento způsob umístění je zvolen zejména kvůli lepší přístupnosti ke snímači. Toto umístění dovolí v případě potřeby, instalaci i rozměrnějších snímačů.

4.3 Výběr vhodného vazebného média

V kapitole 2.3.5 bylo zmíněno, že pro správnou funkčnost snímačů AE je nutné využít správné vazebné médium. Pro snímače akustické emise se využívají speciální vazebné média. Pro nenáročné aplikace se v praxi často využívá krém na ruce, vazelína nebo olej, které zajistí taktéž velice dobrý přenos elastických vln do snímače. Pro zajištění kvalitního přenosu je taktéž nutné mít co nejjemnější kontaktní povrch, nejlépe broušený, aby kontaktní plocha byla co největší. Nedokonalosti v kontaktní ploše vyplní právě vazebné médium.

Zkušební stanice R-mat nepracuje v extrémně vysokých nebo nízkých teplotách, proto není nezbytně nutné využívat speciální vazebná média, která jsou určena do neobvyklých teplot. Ložiskový domek, na kterém bude snímač AE umístěn bude mít broušený povrch pro zlepšení přenosu elastických vln do snímače.

4.3.1 Výběr vhodného konceptu

Jako vazebné médium mezi ložiskovým pouzdrům a snímačem akustické emise je možné využít různá vazebná média. Využito bude vazelíny DURF02, která se na Ústavu konstruování využívá nejčastěji. Doporučuje jí také Schreier ve své práci [21].

4.4 Způsoby uchycení snímače AE

Laboratoř kontaktní únavy materiálu disponuje velkým množstvím různých druhů snímačů AE. Různé snímače jsou konstrukčně řešeny jinak a jsou uzpůsobeny pro jiný typ montáže. Nejčastěji se využívají snímače, které se musejí ke zkoumané součásti přitlačit nebo přilepit, případně snímače disponují permanentním magnetem, díky kterému mohou držet na ocelových konstrukcích.

4.4.1 Přilepení snímače

V aplikacích, kde snímač AE zůstává na jednom místě, se s výhodou snímač ke kontaktní ploše přilepí pomocí speciálních lepidel. Výhodou je stálá a kvalitní fixace snímače, nicméně je nutné snímač opatrně demontovat, aby se nepoškodil. Lepení je vhodné pro trvalé aplikace snímačů, jako je právě instalace na stanici R-mat.

4.4.2 Přitlačení snímače

Další metodou uchycení je mechanické přitlačení, případně přišroubování snímače. Přitlačení nesmí být příliš velké, aby nebylo vytlačeno veškeré vazebné médium, případně aby nedošlo k poškození samotného snímače. Tento princip je vhodný pro dočasné aplikace.

Pro přitlačení musí být využit přípravek, pomocí kterého půjde správně přitlačit snímač. Díky různým velikostem snímačů a zejména různým místům, kam se snímače instalují, bývají přípravky jednocelové. S výhodou lze využít plastového 3D tisku, díky kterému jde jednoduše vyrobít potřebný přípravek.

4.4.3 Pomocí permanentního magnetu

Některé snímače AE disponují permanentním magnetem, pomocí kterého může být snímač připevněn ke zkoumanému povrchu. Podmínkou je, aby zkoumaná součást nebo konstrukce byla magnetická.

V případě aplikace takového snímače na stanici R-mat je zajištěna magnetická konstrukce, nicméně díky vznikajícím vibracím, které mohou být relativně velké, může docházet k samovolnému posouvání snímače po povrchu ložiskového domku. K tomuto posouvání nesmí při měření docházet.

4.4.4 Výběr vhodného konceptu

Snímače AE budou na stanicích R-mat nainstalovány na trvalo. Proto je nejvhodnější metoda uchycení právě přilepení snímačů.

Na stanicích budou realizovány experimenty, pro není vhodné snímač AE přilepit. Vhodnější bude využít magnetický snímač, případně použít přípravek, pomocí kterého bude snímač po dobu experimentu přitlačen. Po vyhodnocení experimentů a zvolení nejvhodnějšího snímače může být snímač natrvalo ke konstrukci přilepen.

4.5 Odlišení původu událostí

Pro snadné odvalování zkušební vzorku mezi přitlačnými válci jsou využity radiální kuličková ložiska. Ložiska jsou umístěna v domcích po stranách a zároveň tyto domky jsou nejvhodnějším místem pro umístění snímačů, protože je nelze umístit na rotující zkušební těleso. Z důvodu, že snímače budou uchyceny na ložiskovém domu, bude primárně docházet k měření stavu ložiska, přičemž podstatné je měřit stav zkušební vzorku. Díky této situaci je nutné ověřovat, zdali měřený signál skutečně pochází ze zkušební tělesa či nikoliv.

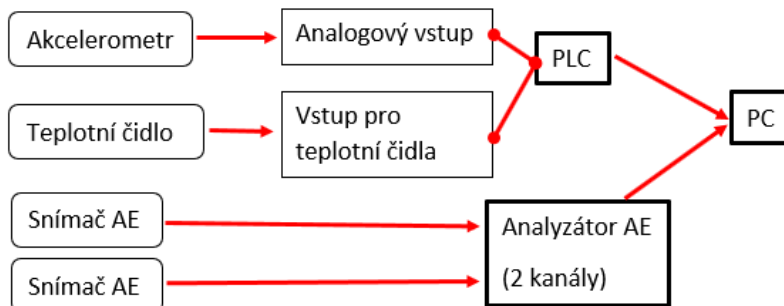
V případě, že v průběhu testu dojde k poškození ložiska, tak je možné, že snímač AE vyhodnotí, že došlo ke vzniku vad na zkušebním tělese. Předpokládá se, že poškozené ložisko nebude mít velký vliv pro měření vibrací.

4.5.1 Pomocí dvou snímačů AE

Výhodou nedestruktivního zkoumání objektů pomocí akustické emise je to, že při použití více snímačů je možné určit místo vady, tzv. lokalizace. V místě vady vznikne hit, který je zaznamenán každým snímačem. Na základě časové prodlevy mezi snímači a rychlosti šíření zvuku v daném materiálu jde dopočítat vzdálenost, v jaké hit vznikl.

Snímače AE by mohly být umístěny na obou ložiskových domcích, čímž by se zajistil dostatečný počet snímačů pro určení polohy vznikajících hitů. Zjištěná poloha by přesně určovala, jestli události vznikají v oblasti jednoho z ložisek, nebo na zkušebním tělese.

Nevýhodou je, že musí být použity dva snímače AE, a proto musí být použit analyzátor, který má minimálně 2 vstupní kanály. Díky této metodě jde přímo lokalizovat místo vzniku události AE a jde tak upozornit na to, že zvýšené měřené hodnoty, které by jinak určovaly vznikající kontaktní únavu, jsou způsobené právě porušeným ložiskem a zkouška by měla být ukončena.



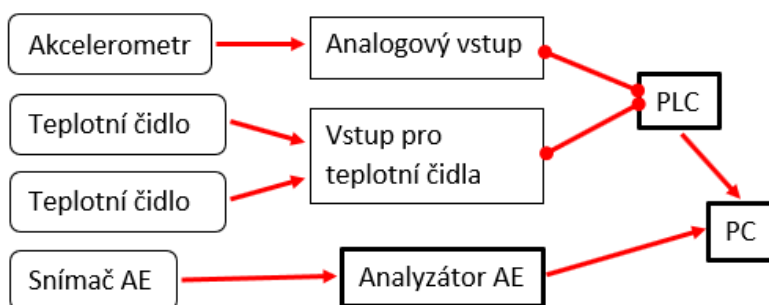
Obr. 4-1 Měřicí řetězec pro variantu se dvěma snímači AE

4.5.2 Pomocí snímačů teploty

V případě, že dojde k porušení ložiska, případě k jeho zadírání, tak je zřejmé, že bude stoupat jeho teplota. Pokud se umístí teplotní čidla na domky ložisek, přímo nad ložisko, tak je možné v průběhu testu monitorovat teplotu obou ložisek.

Pokud bude signál AE naznačovat vznik kontaktní únavy, a přitom bude teplota jednoho, případně obou, ložisek zvýšená, tak je velká pravděpodobnost toho, že signál AE pochází právě z daného ložiska, a ne ze zkušebního vzorku.

Nevýhodou je, že ložiska jsou chlazená olejem, proto by musela teplota vzrůst opravdu hodně, aby byla měřitelná na povrchu domku. Měřená teplota může být zároveň použita pro ukončení zkoušky, když přesáhne určitou hranici, což je zároveň bezpečnostní opatření, aby nemohlo dojít například k samovznícení oleje.



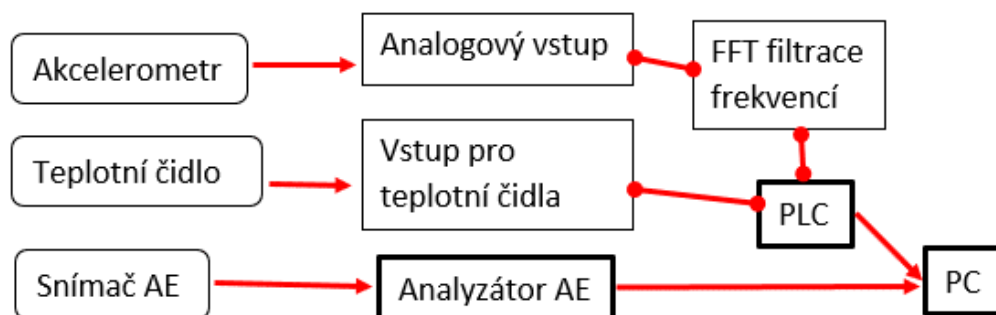
Obr. 4-2 Měřicí řetězec pro variantu se dvěma snímači teploty

4.5.3 Pomocí frekvenční oblasti

Díky možnosti matematického zpracování měřeného signálu je možné signál zpracovávat taktéž ve frekvenční oblasti, a to pomocí FFT. Na celé stanici R-mat je hodně částí, které rotují a mohou na nich vznikat hity, které AE zaznamená, nebo rázy, které zaznamená akcelerometr. Díky tomu, že každá část pracuje s jinou frekvencí, tak můžeme identifikovat tu součást, která je ve frekvenčním spektru signálu nejvíce zastoupena. Případně je možné signál s nevhodnou frekvencí úplně odfiltrout a neuvažovat jej při vyhodnocování.

Na základě frekvencí jde určit, kde signál vzniká. Stanice R-mat je poháněna jedním motorem, který má otáčky závislé na frekvenci v síti, tedy konstantní. Dále jsou otáčky motoru převodovány na přítlačné disky, a ty odvalují zkušební vzorek. Všechny vztahy mezi jednotlivými frekvencemi jsou tedy konstantní a lze je snadno zjistit. Na základě těchto zjištěných frekvencí lze potom lehce určit, co způsobuje největší zastoupení v měřeném signálu. Pokud to nebude frekvence zkušebního vzorku, tak není možné brát měřená data jako věrohodná pro vyhodnocování kontaktní únavy materiálu na zkušebním vzorku.

Výhodou je absence více senzorů a možnost vše provádět softwarově. Taktéž je tímto způsobem možné identifikovat poškozené přítlačné disky, případně jiné části zkušební stanice R-mat. Nevýhodou mohou být násobné frekvence, které zkreslí vyhodnocování.



Obr. 4-3 Měřicí řetězec s FFT filtrací

4.5.4 Výběr vhodného konceptu

Pro přesné zjištění, zda signál AE vzniká primárně na zkušebním vzorku, nebo v porušených ložiscích, je nejvhodnější využít dva snímače AE. Tato metoda je ale finančně náročnější.

Z pohledu efektivnosti a finančních nákladů je nejvhodnější metoda určování vzniku signálu AE pomocí frekvenční oblasti signálu. Signál se pomocí FFT snadno a rychle zpracovává, a takto zpracovaný signál jde využít i pro určování jiných vad, jako například povrchové vady na přítlačných discích. Tato metoda může sloužit i pro jednoduchou diagnostiku celé stanice R-mat.

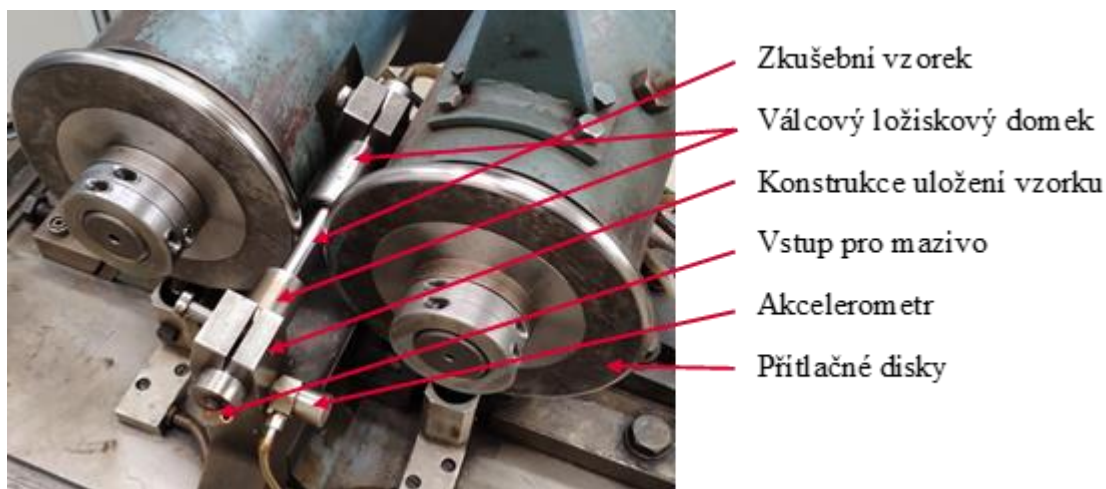
Nevýhodou této metody je, že snímače AE mají svůj frekvenční rozsah typicky v rozmezí 100 kHz až 4 MHz, takže je těžké jednoznačně identifikovat nízké frekvence. Zkušební vzorek se otáčí frekvencí v řádech stovek Hz a přítlačné disky v řádech desítek Hz. Pro tuto aplikaci je vhodnější využívat signál z akcelerometrů, který má frekvenční rozsah 0 Hz až 19,75 kHz. Pro aplikaci FFT je nutné využívat obálku měřeného signálu, takže FFT musí být provedena přímo v PLC. Tato implementace do PLC vyžaduje značné znalosti a zkušenosti, také dokumentace k daným modulům není zcela jednoznačná. Z těchto důvodů, není v rámci této práce, tuto metodu možné využít.

Bude využita metoda s použitím dvou snímačů teploty. Touto metodou bude možné diagnostikovat stav podpůrných ložisek. Vyhodnocování teploty bude muset být implementováno do řídicího kódu pro PLC.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

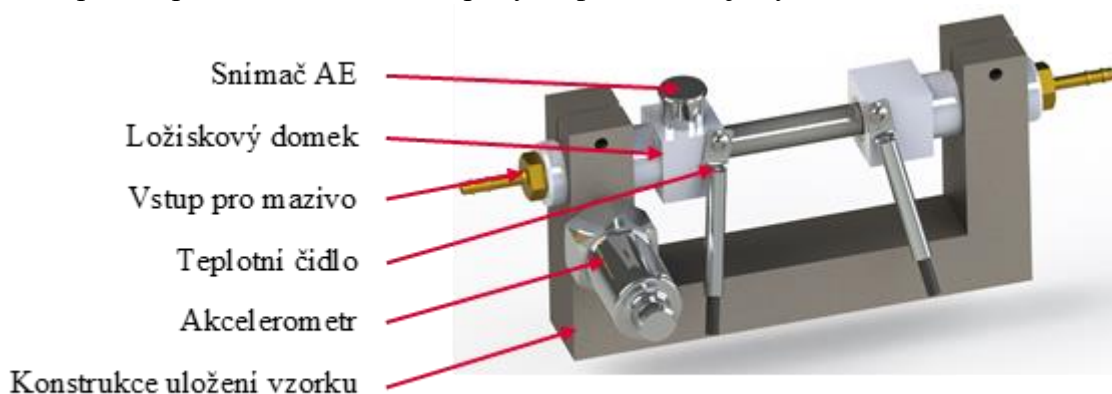
5.1 Umístění snímačů

Na modernizovanou stanici R-mat je nutné umístit nové snímače. Jsou to akcelerometry, snímače AE a teplotní čidla. Nejvhodnější místo, kam snímače umístit jsou právě ložiskové domky, ve kterých je uložen zkušební vzorek. Stávající ložiskové domky jsou válcové po celé své délce a nedovolují instalaci těchto snímačů, a proto musejí být vyrobeny nové, na které je možné všechny zmíněné snímače nainstalovat.



Obr. 5-1 Původní uložení vzorku

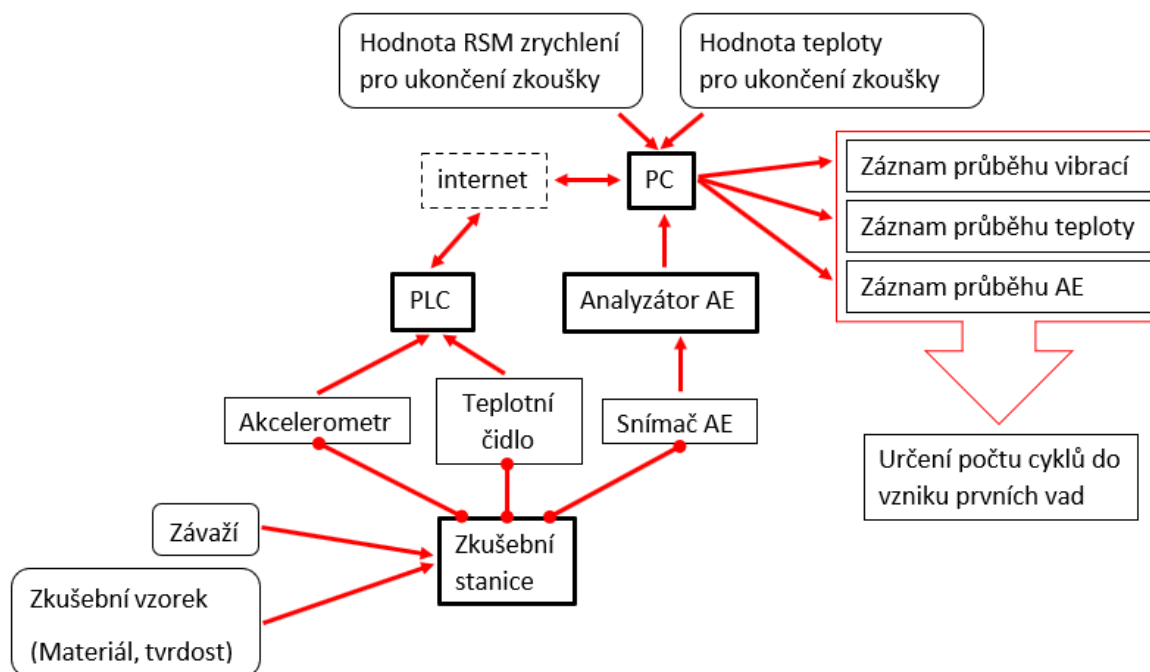
Nová ložisková pouzdra jsou z části válcová, aby mohla být uložena do stávající konstrukce beze změny a z části jsou čtyřhranné. Na každé zkušební stanici musí být vyměněny obě pouzdra, aby bylo možné na jedno připevnit snímač AE a teplotní čidlo, a na druhé pouze teplotní čidlo. Pro jednoduchost výroby jsou obě pouzdra stejná, není rozlišováno pravé a levé pouzdro. Na horní rovinnou plochu, která je broušená, je možné přilepit snímač AE a na boční plochu přišroubovat snímač teploty. V příloze č. 1 je výkresová dokumentace.



Obr. 5-2 Umístění snímačů

Modernizován byl i přívod maziva. Na zadní části ložiskového pouzdra je závitový otvor, který slouží pro přišroubování hadicové vsuvky. Následně se mazivo dostává přes duté ložiskové pouzdro až k samotnému ložisku, které je tak stále mazáno, aby se minimalizovalo jeho opotřebení.

Umístění akcelerometrů zůstává stejné, akcelerometry jsou přišroubovány do konstrukce držící ložiskové domky včetně zkušební vzorku. Vhodnější by bylo akcelerometry umístit přímo na ložiskový domek, kde by byly nejbližší zkušebnímu vzorku. Díky stávající konstrukci celé stanice R-mat není možné nový akcelerometr umístit přímo na ložiskový domek. Nové akcelerometry jsou velké a kolidovaly by tak se zatěžujícími disky.



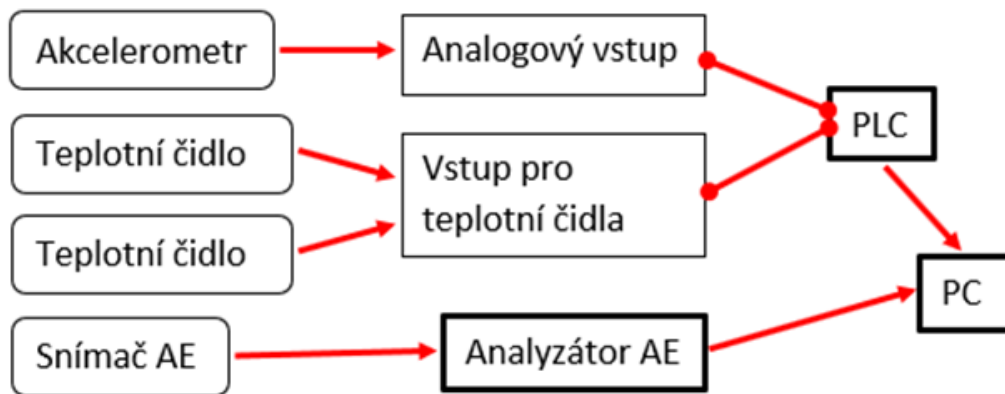
Obr. 5-3 Schéma funkce modernizované stanice R-mat

5.2 Princip funkce

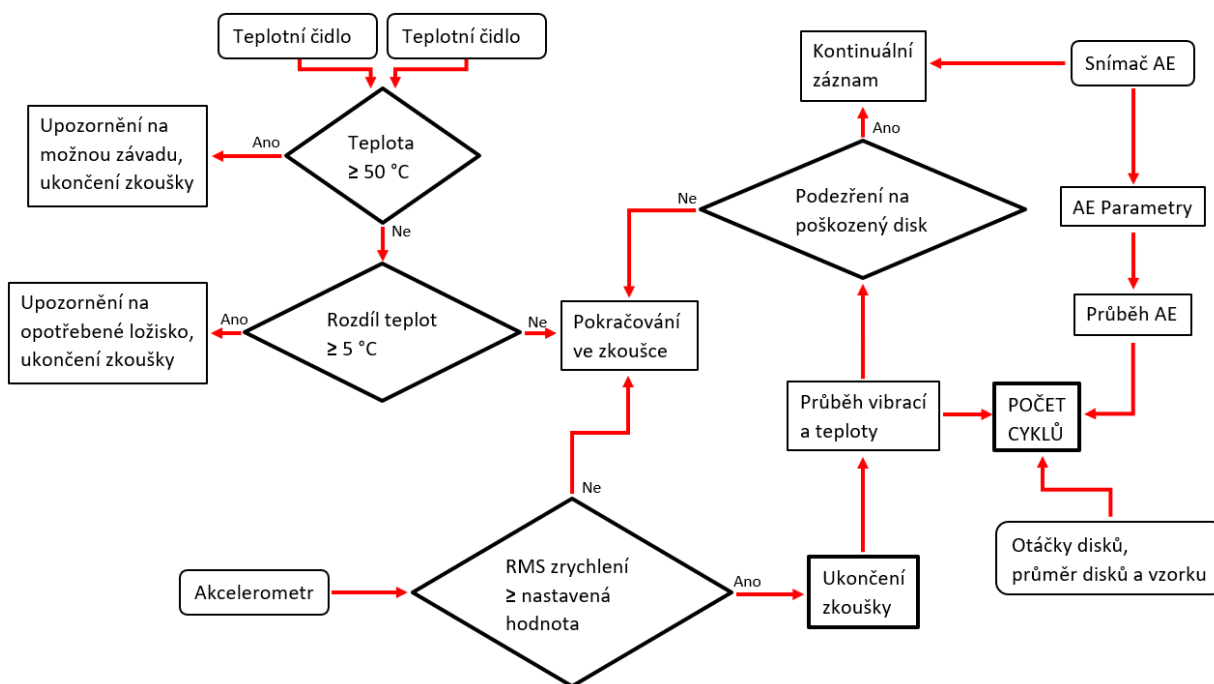
Z analýzy problému a kapitoly 5.1 vyplývá, že na stanici budou umístěny nové snímače. Celá modernizace spočívá v zásadní změně elektroniky, tudíž došlo ke změně funkčnosti. Princip, kterým stanice pracuje je patrný ze schématu na Obr. 5-3.

Z původní zkušebny zůstaly pouze zkušební stroje, do kterých se vkládají zkušební vzorky a nastavuje se na nich zatížení kontaktu pomocí visícího závaží. Vstupními parametry pro realizaci zkoušky jsou tedy závaží, prahová hodnota RMS zrychlení (vibrací) a prahová hodnota teploty. Výstupními parametry jsou záznamy o průběhu vibrací, teploty a záznam z akustické emise. Na základě těchto výstupních záznamů je zkouška vyhodnocována.

Použitý měřicí řetězec je znázorněn na Obr. 5-4. PLC zpracovává signál z akcelerometrů a snímačů teploty. Jsou k tomu využívány externí přídavné moduly, kterými lze snadno rozšířit vstupy PLC značky B&R. Signál měřený snímači AE je zpracováván v analyzátoru AE a následně jsou ze signálu pomocí FFT odfiltrovány frekvence, které nejsou generovány zkušebním vzorkem. Zpracovaný signál z PLC i analyzátoru AE je přenášán do PC. Vyhodnocování je patrné z vývojového diagramu na Obr. 5-5.



Obr. 5-5 Měřicí řetězec modernizované stanice



Obr. 5-4 Vývojový diagram vyhodnocování zkoušek

5.3 Výběr vhodného snímače AE

Existuje velké množství snímačů AE, přičemž každý je vhodnější pro jiný typ aplikace. Vhodný snímač pro stanice R-mat byl vybrán na základě experimentu. Bylo vybráno 6 různých typů a velikostí snímačů od firmy Dakel, které byly následně testovány.



Obr. 5-6 Testované snímače AE (zleva číslo 1 až 6)

5.3.1 Princip testu

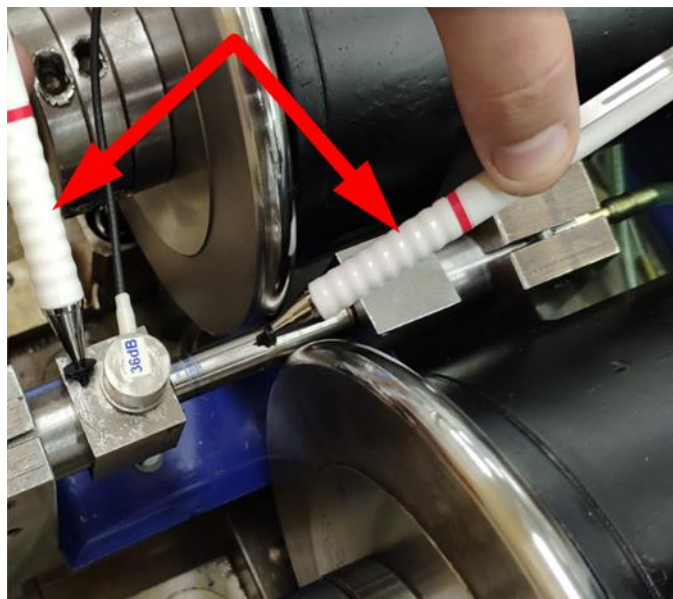
Elastické vlny vznikající ve zkušebním vzorku musí projít pěti rozhraními, než se dostanou do snímače AE a mohou být snímačem zaznamenány. Každé rozhraní způsobuje útlum měřeného signálu, a proto musel být vybrán snímač s vysokou citlivostí.

Jednotlivé snímače byly připevněny k ložiskovému pouzdru, vazebné médium tvořila vazelína DURF02. Měřena byla amplituda na hit z generátoru pulzů PENPULSER od firmy Dakel, který slouží pro kalibraci snímačů, aby byly zajištěny stejné pulzy pro každý snímač. Pro všechny snímače byla nastavena stejná velikost zesílení, aby mohlo být zesílení amplitud navzájem porovnatelné.



Obr. 5-7 Měření amplitudy pulzu

Druhé měření (Obr. 5-8) porovnávalo přenos rázu ze zkušebního vzorku do snímače AE. Pro toto měření již nemohl být využit generátor pulzů, protože generoval příliš slabé pulzy a ty nebyly detekovány přes všechny rozhraní. Pro generování pulzů bylo využito principu PenTestu, který byl popsán v kapitole 2.3.4. Zlomení tuhy 0,3 mm z mikrotužky vygenerovalo dostatečně velký pulz, aby nebyl utlumen v rozhraních. Pro zjištění přenosu signálu ze zkušebního vzorku, musel být tento signál porovnán se signálem vygenerovaným přímo na ložiskovém pouzdra v blízkosti snímače AE. Přenos byl určen jako poměr amplitud pulzu ze zkušebního vzorku a pulzu z ložiskového pouzdra.



Obr. 5-8 Princip zkoušky porovnání útlumu

5.3.2 Vyhodnocení

Výsledky z experimentu jsou zobrazeny v tabulce Tab. 2. V tabulce jsou zisky jednotlivých snímačů, které byly měřeny se stejným zesílením, aby byly porovnatelné. Největší zisk a nejmenší odchylky při měření vykazuje snímač č. 4 s permanentním magnetem, ale je velice slabě citlivý na přenos rázů ze zkušebního vzorku. Dále tabulka ještě srovnává přenos rázů ze zkušebního vzorku.

Jako nejlepší snímač pro aplikaci na stanicích R-mat se zdá být malý snímač MIDI-283-06, který má průměrný zisk, ale zároveň přenesl téměř 95 % signálu ze zkušebního vzorku. Velice dobře si taktéž vedl snímač č. 3.

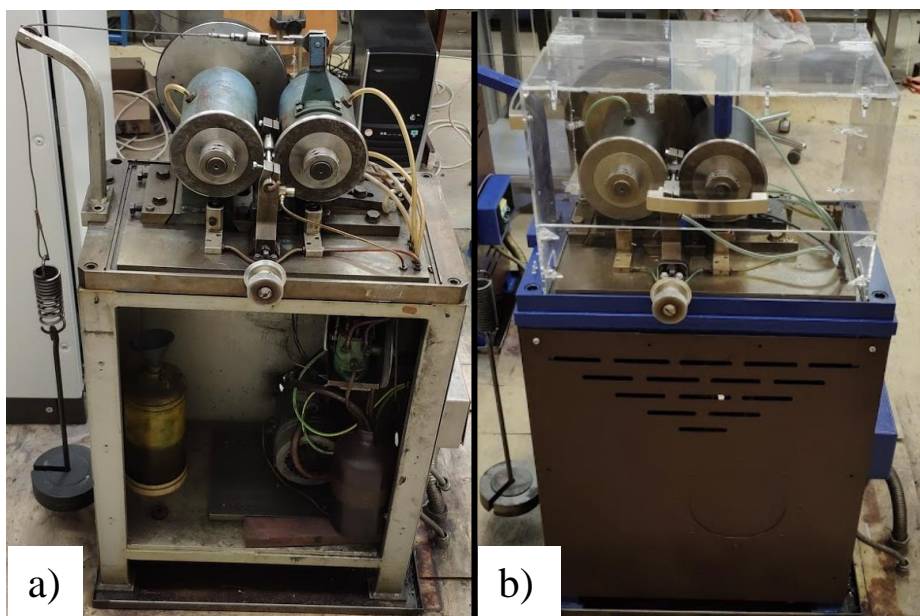
Tab. 2 Porovnání snímačů AE 5.4

Číslo	Snímač		Měřená data		Odchylka měření [dBAE]	
	Označení	Způsob montáže	Maximální amplituda [dBAE]	Přenos signálu ze vzorku [%]	Generátor pulzů	PenTest
1	MIDI-291-01	přítisknutí	84,9	7,6	0,18	0,81
2	MIDI-283-06	přítisknutí	83,4	94,9	0,23	1,51
3	IDK14AS2-450-04	přítisknutí	80,3	80,5	0,25	1,06
4	MDK13AS-531-01	magnetický	93,5	16,9	0,22	0,47
5	MTPA05ax	přítisknutí	80,3	72,1	0,58	3,53
6	MTPA15-296-05	přítisknutí	84,0	9,5	0,41	0,49

5.4 Modernizace pohledových částí

5.4.1 Barevný nástřik

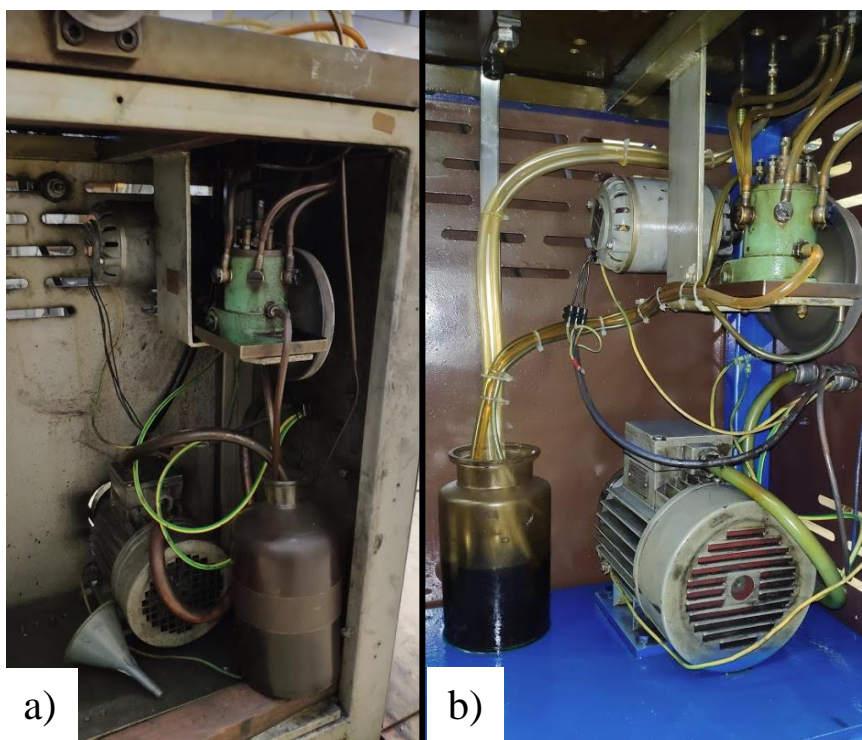
Stáří zkušebních stanic bylo znát také na pohledových částech. Aby celá zkušební stanice také působila dojmem moderní laboratoře, bylo nutné jednotlivé zkušební stanice nástříkat a barevně je všechny sjednotit. Díky barevnému nástřiku se barevně odlišila konstrukce stanice a krycí plechy.



Obr. 5-9 a) původní stav; b) nově nástříkaná stanice

5.4.2 Výměna rozvodů maziva

Modernizované stanice byly vyčištěny od starého stečeného oleje a byly vyměněny zteřelé hadičky pro rozvod maziva k rotačním součástem a hadice propojující olejové čerpadlo s nádrží na olej. Tyto hadice byly přichyceny ke konstrukci, aby se zabránilo nechtěnému kontaktu hadic s rotujícími řemenicemi, případně samotným řemenem.



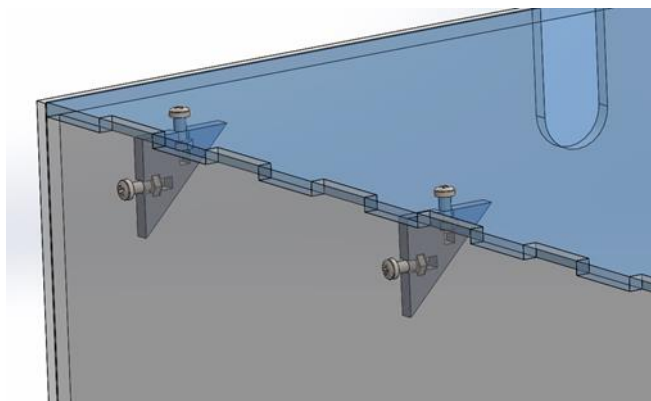
Obr. 5-10 Rozvod maziva: a) původní stav; b) současný stav

5.4.3 Krytování stanice

Při provozu stanice dochází k rozstříku maziva od rotujícího vzorku. Vzniká tak olejový aerosol, který se šíří po místnosti. Z tohoto důvodu je nutné mít celou stanici zakrytovanou, aby se šíření aerosolu po místnosti minimalizovalo. Zároveň musí být kryt lehce odnímatelný, aby byla možná snadná výměna vzorku.

Původní stanice disponovaly kryty, které byly nepraktické a po letech provozu byly téměř neprůhledné a popraskané. Proto musely být vyměněny za nové. Na jedné, částečně modernizované stanici, byl kryt již vyměněn. Za pár let provozu byly zjištěny nedostatky tohoto krytu a při návrhu a výrobě nových krytů byly tyto nedostatky odstraněny.

V novém krytu je lépe zajištěno spojování jednotlivých dílů. Díky využití technologie laserového řezání, která je velice vhodná pro dělení tabulí plexiskla, konkrétně PMMA. Bylo možné pro spojování jednotlivých částí použít tvarové zámky, které byly následně lepeny a zajištěny přišroubovanými vzpěrami, jak je patrné z Obr. 5-11.



Obr. 5-11 Spojování dílů krytu

Nové kryty již není nutné ze stanice sundávat. Otevření krytu umožňuje demontování závaží a pohodlnou práci se zkušebními vzorky. Výrobní dokumentace a digitální data pro výrobu jsou v příloze č. 2.



Obr. 5-12 Zakrytovaná modernizovaná stanice

5.5 Řídicí software

O řízení všech zkušebních stanic se stará PLC s řadou přídatných modulů. Kód pro řízení PLC byl převzat a upraven z řízení stanic Axmat, který vytvořil Ing. Zbyněk Strecker Ph.D. Při zkouškách funkčnosti modernizované stanice byly zjištěny nedostatky, které bylo nutné upravit. Úpravy se týkaly zejména diagnostikování vadného ložiska a menších úprav ve vzhledu ovládacího panelu. Těmito úpravami se zabývá tato práce.

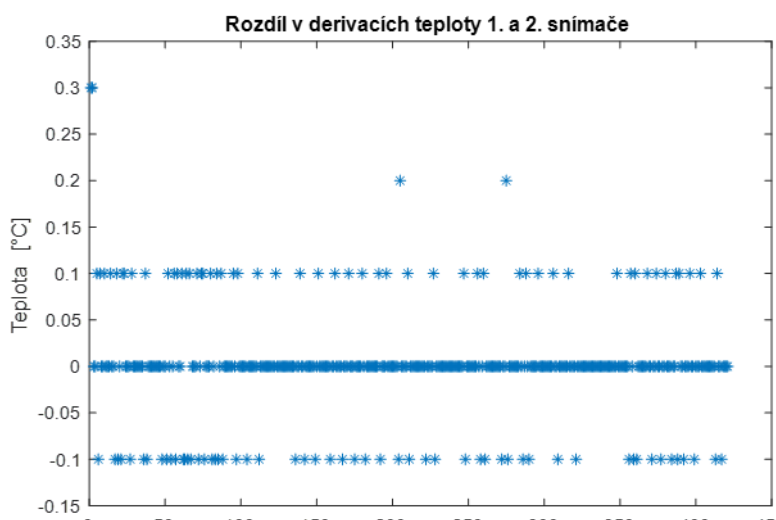
5.5.1 Diagnostika vadného ložiska

Jak bylo zmiňováno v kapitole 4.5, tak bylo nutné upravit řídicí software tak, aby byl schopný detekovat vadné ložisko, aby se zabránilo špatnému vyhodnocení zkoušky.

Byla vybrána koncepční varianta, která spočívá v měření teploty obou ložiskových pouzder. Na obě pouzdra byly přimontovány snímače teploty a následně byly připojeny k rozšiřujícímu modulu PLC.

V řídicím kódu bylo nutné upravit proměnnou, do které se ukládají hodnoty z měřených signálů. Ve výstupním souboru jsou uloženy data z měření vibrací, teplot předního a zadního ložiskového pouzdra a čas zapsání hodnoty. Tyto hodnoty mohou být dále zpracovávány ve vyhodnocovacím software, který je popsán v kapitole 5.6.

Při testování více snímačů teploty se ukázalo, že naměřená hodnota teploty se mírně liší u každého kusu snímače. Proto byl proveden experiment, který srovnával na dvou snímačích zejména odezvu na změnu teploty. Oba snímače byly přimontovány ke stejnému ložiskovému pouzdru, aby moha být porovnána jejich odezva. Graf na Obr. 5.13 znázorňuje rozdíl v derivacích teploty z 1. a 2. snímače. Ukázalo se, že odezva na změnu teploty je velice podobná, jen hodnota naměřené teploty se liší, což lze jednoduše spravit kalibrací.

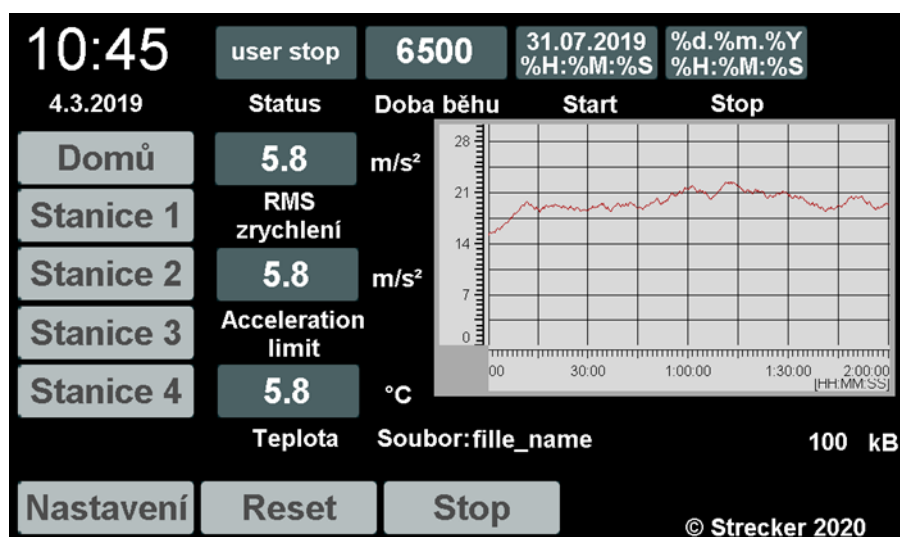


Obr. 5-13 Graf rozdílu derivací teploty 1. a 2. snímače

Kromě ukládání obou hodnot teploty bylo nutné také upravit ovládání stanic, respektive automatické zastavení stanice v případě, že došlo ke zvýšení teploty pouze na jednom z ložiskových pouzder. Jak ukázal experiment, tak každý snímač, pokud není zkalibrován, měří rozdílně, ale se stejnou odezvou. Pro vyhodnocení, že došlo k nárůstu teploty na ložiskovém pouzdru z důvodu poškození ložiska, byl zvolen nárůst teploty o 5 °C, případně je možné tuto hodnotu jednoduše změnit v nastavení ovládacího panelu. Tato hodnota je tak velká, že zahrnuje chybu jednotlivých snímačů v odezvě a kalibraci. Z důvodu, že není nutné přesně znát teplotu ložiskového pouzdra, je možné využívat teplotní čidla bez přesné kalibrace. Zkouška je automaticky zastavována, pokud se teploty ložiskových pouzder budou lišit o více než je nastavený rozdíl (např. 5 °C).

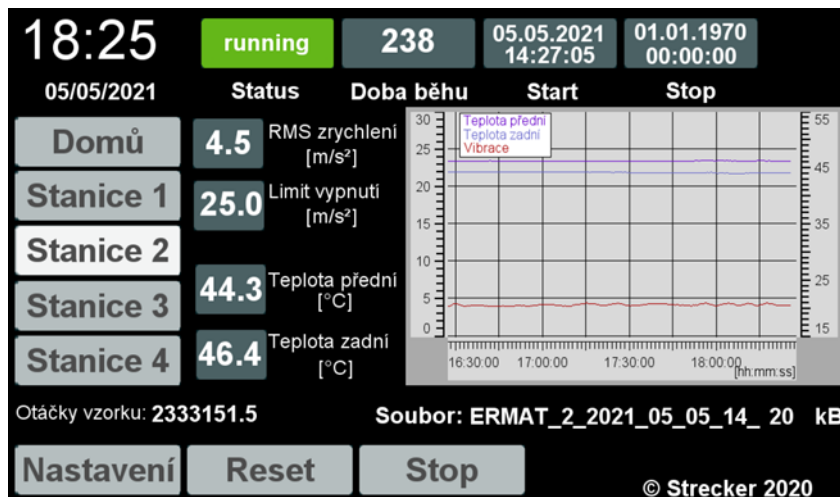
5.5.2 Úpravy ovládacího panelu

V průběhu provádění testovacích zkoušek se ukázalo, že převzatý kód pro řízení PLC má nedostatky i v uživatelském rozhraní, tedy ve virtuálním ovládacím panelu. Původní vzhled a rozložení je patrné z Obr. 5-14. Upravený vzhled je na Obr. 5-15.



Obr. 5-14 Původní vzhled ovládacího panelu

Do ovládacího panelu musely být přidány zejména teploty z obou snímačů a taktéž zakomponovány do průběžného grafu zkoušky. Dále byla přidána informativní hodnota o vykonaných otáčkách zkušební vzorku, aby obsluha měla představu, kolik cyklů již proběhlo. Na stanicích je možné testovat i jiné průměry zkušebních vzorků, takže bylo nutné přidat možnost zadávání průměru zkušební vzorku, aby byl výpočet cyklů správný. Obr. 5-15 ukazuje aktuální podobu virtuálního ovládacího panelu.



Obr. 5-15 Aktuální vzhled virtuálního ovládacího panelu

5.6 Vyhodnocování

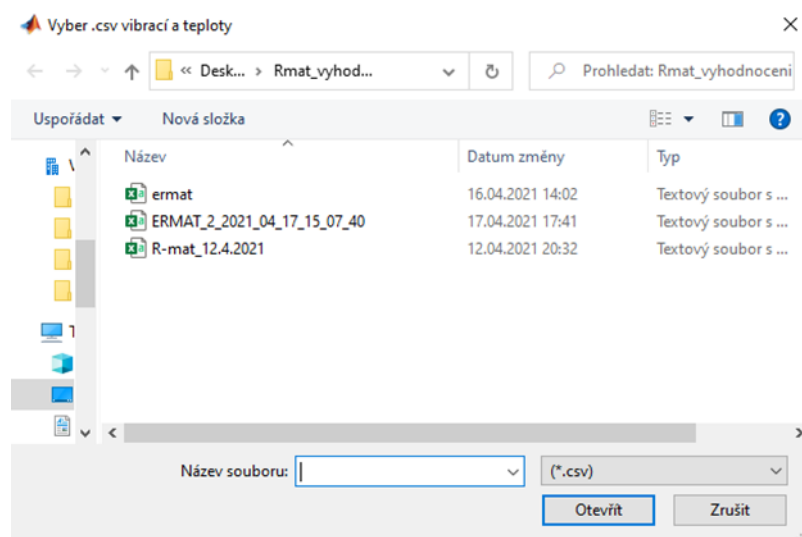
Jednou z výhod modernizované stanice je to, že jsou záznamy ze zkoušek archivovány. Po ukončení zkoušky je možné pomocí naměřených signálů celou zkoušku zrekonstruovat a přesně určit, ve který okamžik došlo ke kontaktnímu porušení materiálu. Toto vyhodnocování je realizováno v prostředí softwaru Matlab.

5.6.1 Importování dat

Naměřená data vibrací a teploty jsou ukládána na disk PLC ve formátu .csv. Signál AE je zpracováván a ukládán pomocí softwaru ZDaemon na externím počítači. Software ZDaemon primárně data ukládá ve svém interním formátu, ale mohou být jednoduše exportována do textového souboru .txt.

Po spuštění vyhodnocovacího skriptu v Matlabu je uživatel vyžádán, aby vybral cestu k souborům .csv z PLC a souboru .txt. Tyto dva soubory jsou poté naimportovány do pracovního prostoru v Matlabu a dále zpracovávány.

Jakmile jsou zadány soubory, je nutné, aby uživatel vyplnil v dialogovém okně některé informace o zkoušce. Stanice jsou různé je možné testovat zkušební vzorky s různými průměry, proto je nutné zadat průměr zkoušeného vzorku a vyplnit číslo stanice, na které byla zkouška vykonána.



Obr. 5-16 Dialogové okno pro výběr cesty k souboru

5.6.2 Zpracování dat

Po importu jednotlivých souborů jsou data sjednocena a převedena na stejný datový typ. Následně je také sjednocena vzorkovací frekvence jednotlivých signálů, aby data byla správně vykreslena. U signálu AE musí být signál „oříznut“, protože se záznam AE neukončuje automaticky při konci zkoušky. Signály jsou také časově synchronizovány podle jejich časové známky.

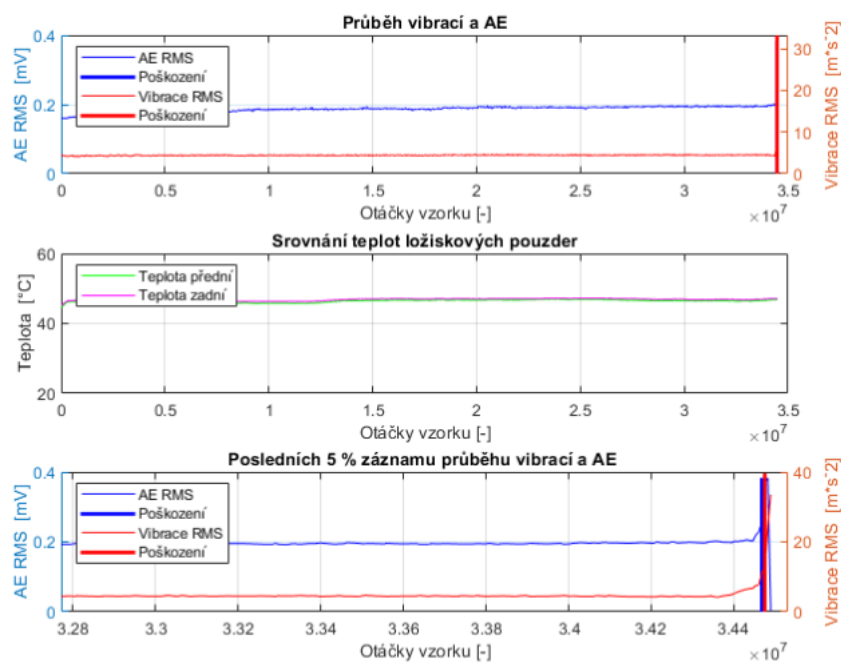
Dále je přepočítáván čas zkoušky na otáčky zkušebního vzorku, aby byl lehce určený výstup ze zkoušky. Signály jsou derivovány, aby na základě nízké derivace mohla být smazána „neměnná“ data a výsledný průběh v grafu byl čistší. Rovněž jsou označena i místa s maximální derivací, protože zde došlo ke skokovému nárůstu měřené hodnoty, tedy ke vzniku kontaktního poškození materiálu.

5.6.3 Interpretace výsledků

Výsledky jsou interpretovány zejména zobrazením průběhu zkoušky v grafu. Vyhodnocení tvoří 3 grafy (viz Obr. 5-17). První graf zobrazuje průběh vibrací a RMS akustické emise. Druhý graf zobrazuje průběh obou měřených teplot a poslední graf zobrazuje posledních 5 % průběhu zkoušky, aby mohl být jednodušeji identifikován i rozvoj poškození.

Ve všech grafech je vyznačeno místo, kde došlo k poškození. Poškození na zkušebním vzorku, nebo opěrných ložiscích.

Na závěr je vygenerováno dialogové okno, které shrnuje všechny podstatné informace ze zkoušky. Vyhodnocovací skript je součástí přílohy č. 3.



Obr. 5-17 Vykreslení grafů ze zkoušky

Pro určení času, kdy vzniklo poškození vzorku byla použita metoda nejprudšího nárůstu měřeného signálu. Z dostupných měření se zdála tato metoda jako vhodná. Z časové náročnosti zkoušek nemohlo být provedeno dostatečné množství zkoušek, a proto je možné, že tato metodika není úplně vhodná. Další vhodnou metodou pro vyhodnocení se zdá být překročení měřeného signálu o určité procenta, vůči ustálenému stavu. Z nedostatečného množství zkoušek a zkušeností je obtížné určit o kolik procent by musel signál vzrůst, aby bylo identifikováno poškození nebo rozvoj poškození.

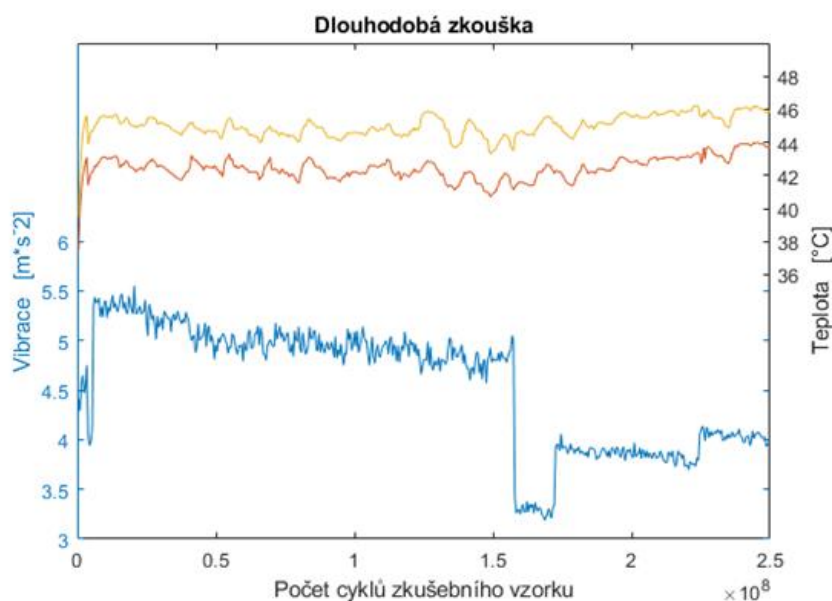
5.7 Ověření funkčnosti

Za účelem ověření správné funkčnosti modernizace zkušebních stanic R-mat bylo vykonáno několik experimentů. Experimenty prokazují funkčnost stanice a řídicího systému, a také napomohly k navržení parametrů pro řízení.

5.7.1 Dlouhodobá zkouška

Tento typ materiálových zkoušek je specifický zejména relativně dlouhým průběhem zkoušky. Doba zkoušky se pohybuje v řádech týdnů, a proto bylo důležité ověřit, že nový řídicí systém dovolí bezproblémový chod v tak dlouhém čase.

Z časových důvodů nebylo možné provést zkoušku trvající měsíc a déle, ale byla provedena zkouška trvající 19 dní. Průběh této zkoušky je patrný z grafu na Obr. 5-18.



Obr. 5-18 Záznam z dlouhodobé zkoušky

Po několika hodinách zkoušky se ukázalo, že v novém řídicím systému je nastaven nízký limit pro ukládání souboru. Po překročení tohoto limitu bylo zastaveno ukládání, ale zkouška pokračovala dál. Tato chyba byla způsobená špatnou konfigurací a byla odstraněna. Aktuálně je možné pomocí PLC ukládat záznam dlouhý cca 400 dní, což je více než dostačující.

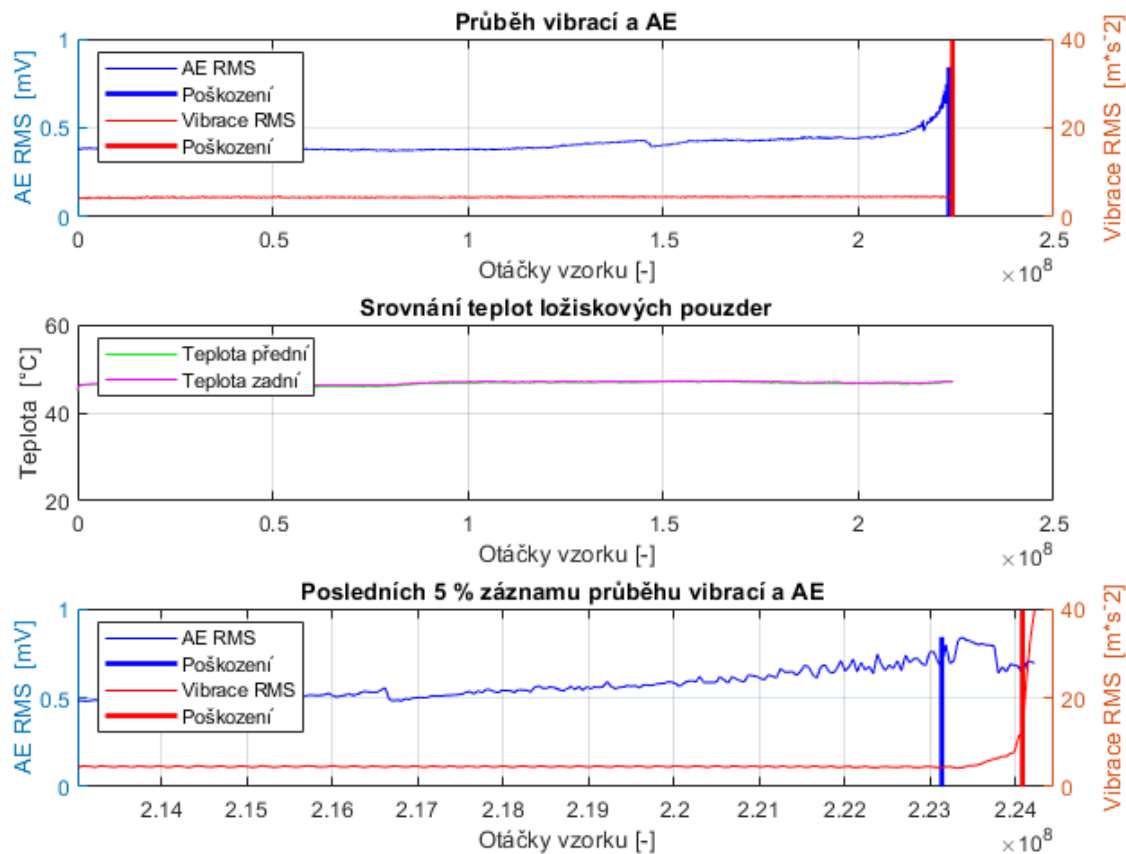
Dále jsou na grafu Obr. 5-18 patrné skokové změny vibrací, ty byly způsobeny změnou zatížení v průběhu zkoušky.

Tento experiment odhalil nedostatek v řídicím softwaru, který byl opraven a zároveň byla ověřena dlouhodobá spolehlivost celého systému. Z časových důvodů již nemohla zkouška probíhat déle.

5.7.2 Zkouška kontaktní únavy materiálu

Na modernizované stanici proběhly kompletní zkoušky kontaktní únavy materiálu, aby se ověřilo, zda je stanice plně funkční. Z důvodů časové náročnosti únavových zkoušek a omezenému přístupu do laboratoří, nebylo možné provést dostatečné množství zkoušek, na základě kterých, by bylo možné přesněji zvolit metodiky vyhodnocování.

Byl testován typizovaný zkušební vzorek s průměrem 9,6 mm, výrobní výkres vzorku je součástí přílohy č. 2. Vzorek byl vyroben z ložiskové oceli AISI 52100, tvrdost vzorku byla HRC 60. Hertzův tlak v kontaktu byl počítán pomocí online kalkulátoru [26] a byl 5,14 GPa, který vyvozovalo zatížení o hmotnosti 36,7 kg. Snímač zrychlení byl 0ACS100A.00-1 od výrobce B&R. Snímač akustické emise byl zvolen MIDI-283-06 od výrobce Dakel.



Obr. 5-19 Průběh ze zkoušky kontaktní únavy materiálu

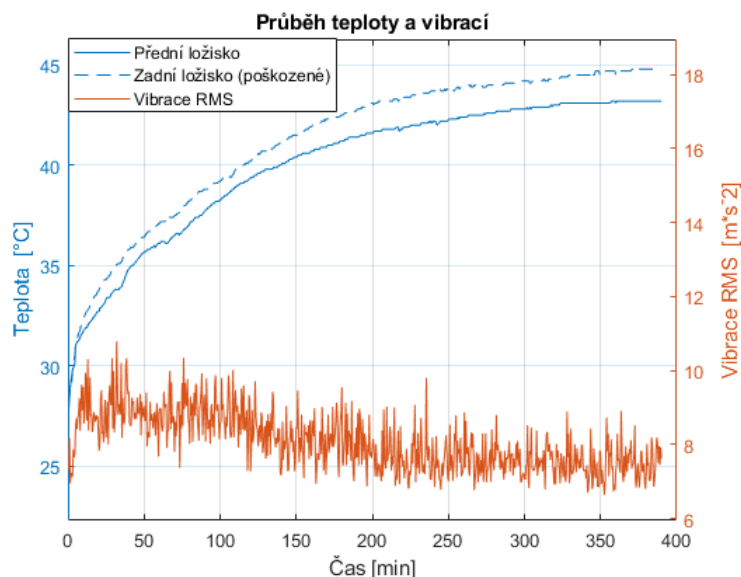
Z průběhu zkoušky je patrné, že proběhla kompletně celá zkouška. Na zkušebním vzorku bylo pouze jedno místo porušené pittingem (viz Obr. 5-20), ukončení zkoušky je správné. Akustická emise dokázala zaznamenat i rozvoj kontaktního poškození.



Obr. 5-20 Pitting na zkušebním vzorku

5.7.3 Zkouška diagnostiky opěrných ložisek

Při zkoušce diagnostiky opěrných ložisek bylo zadní ložisko úmyslně vyměněno za opotřebené, aby se ověřilo, jakým způsobem se projevuje poškozené ložisko. Průběh tohoto experimentu je na Obr. 5-21.



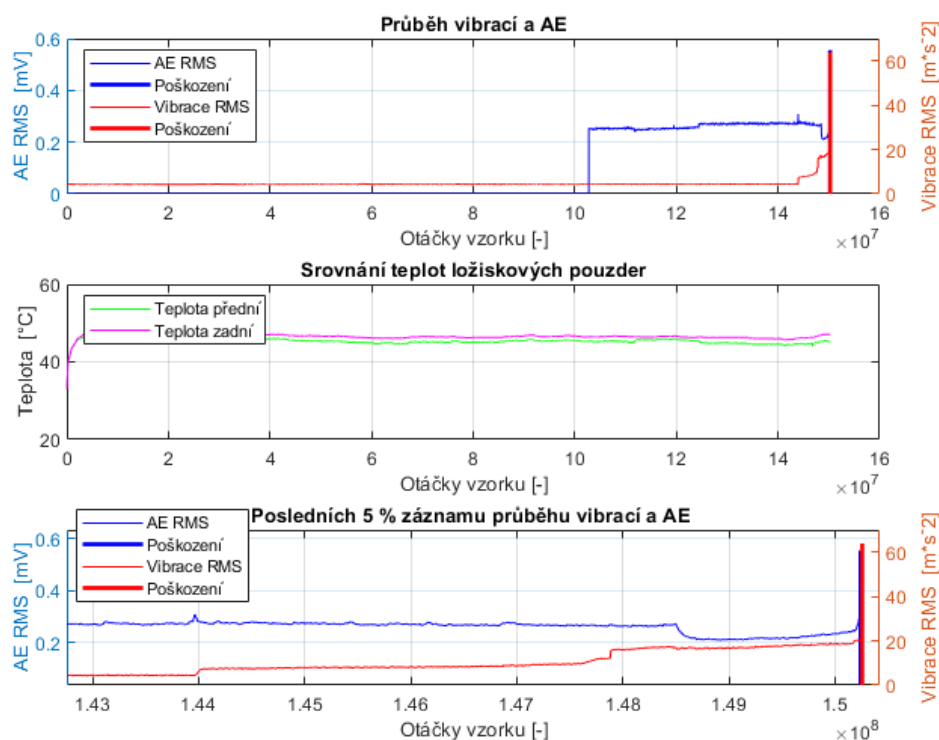
Obr. 5-21 Průběh experimentu s opotřebeným ložiskem

Z průběhu teplot obou ložiskových pouzder se ukázalo, že zadní pouzdro má průměrně vyšší teplotu o 1,3 °C, maximálně však o 1,7 °C. Zajímavý byl taktéž průběh vibrací. Hodnota RMS zrychlení hodně kolísala a měnila se v řádech jednotek až desítek %, což naznačuje nestandardní chování a neblíží se ustálenému stavu.

Z experimentu vyplynulo, že teplotní rozdíl mezi novým a opotřebeným ložiskem je nízký, a není možné z tak malém rozdílu teplot prohlásit ložisko za opotřebené, může se jednat jen o varování obsluhy. Je nutné taktéž uvážit skutečnost, že ložiska nejsou zatížena téměř žádnou radiální ani axiální silou a nemají důvod se zahřívat. Diagnostikovat poškozené ložisko je možné i jinými způsoby, například pomocí frekvenčního spektra signálu z akcelerometrů, nebo jak se u tohoto experimentu ukázalo, nestandardním kolísáním hodnoty RMS zrychlení v řádech jednotek až desítek procent. Zmíněné diagnostiky dokáží indikovat možnost poškození ložisek, ale nedokáží určit, o které ze dvou ložisek jde. Právě měření teploty obou ložiskových pouzder může tuto diagnostiku ucelit.

5.7.4 Diagnostika přítlačných disků

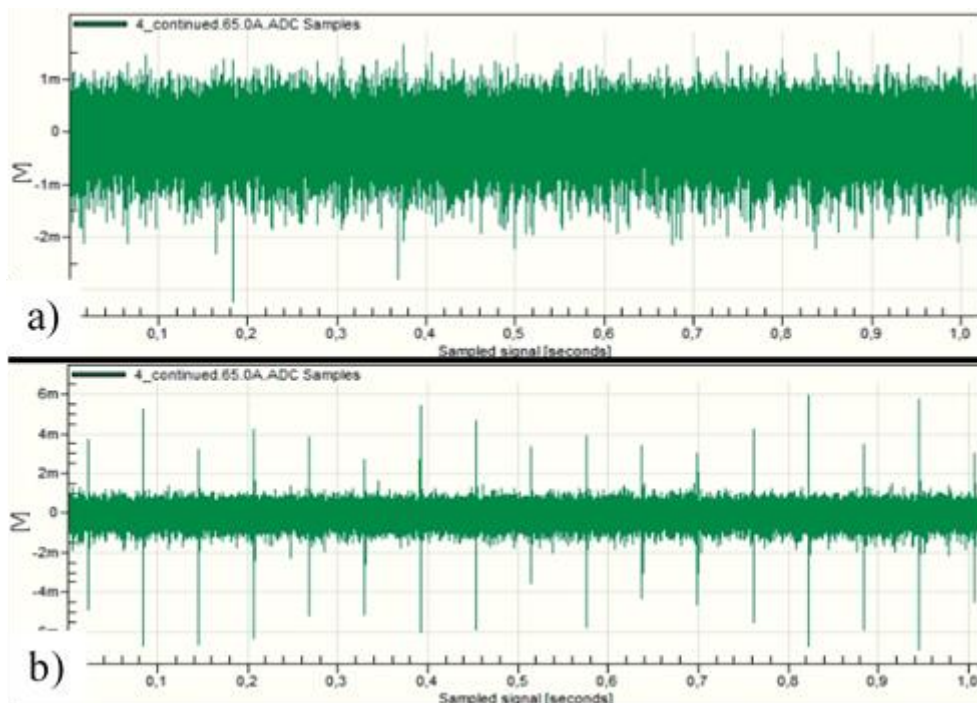
Bylo záměrem vyměnit jeden z přítlačných disků za disk s povrchovým pittingem, aby bylo možné pozorovat chování stanice a diagnostikovat toto poškození. V průběhu jedné zkoušky se přítlačný disk poškodil samovolně, a tato zkouška mohla být použita pro diagnostikování stavu přítlačného disku. Průběh z této zkoušky je na Obr. 5-22. Záznam z AE byl při této zkoušce z technických důvodů zapnut opožděně.



Obr. 5-22 Průběh zkoušky s poškozeným přítlačným diskem

Před koncem zkoušky jsou vidět dva skokové nárůsty vibrací. Z analýzy kontinuálního záznamu AE bylo zjištěno, že před prvním nárůstem RMS zrychlení („čas“ $1,437 \cdot 10^8$ otáček vzorku) se v signálu neobjevovaly žádné opakující se zřetelné rázy (Obr. 5-23a). Z kontinuálního signálu po změně vibrací („čas“ $1,442 \cdot 10^8$ otáček vzorku) jsou jasné zřetelné rázy (Obr. 5-23b). Byla změřena frekvence těchto rázů a je 16,4 Hz, což odpovídá frekvenci přítlačného disku 16,5 Hz, nepřesnost je způsobena měřením otáček disku.

Byl proveden pouze jeden experiment, proto nejde přesně určit jak se projevuje tento typ vady v signálu vibrací. Pokud by tento průběh nastával pravidelně při porušení přítlačných disků, bylo by je možné diagnostikovat skokovou změnou signálu v řádech desítek %. Vznik pitingu na zkušební vzorku se zdá být identifikovatelný pomocí skokové změny vibrací v řádech stovek %.



Obr. 5-23 Kontinuální záznam AE při poškození disku: a) před poškozením; b) po poškození

6 DISKUZE

Rešeršní část této práce se zabývala analýzou podobných zkušebních strojů, jako jsou stanice R-mat. Dále byly popsány metody a způsoby vyhodnocování, kterými je možné vyhodnotit kontaktní poškození materiálu v průběhu zkoušky. Byl popsán původní stav stanic R-mat se zaměřením na jeho nedostatky.

Hlavním nedostatkem původního řešení bylo zejména vyhodnocování zkoušek. Vyhodnocování bylo přímo závislé na zkušenostech obsluhy s nastavováním stanic, což bylo nutno rekonstruovat odstranit. Dalším nedostatkem původních stanic bylo zastaralé elektronické řízení, které bylo potřeba kompletně vyměnit za moderní. Zapojení nového řízení pomocí průmyslového PLC nebylo náplní této práce. V práci je řešena až následná úprava řídicího softwaru. Současně s moderní řídicí elektronikou byly instalovány i nové snímače. Snímač zrychlení pro zaznamenávání průběhu vibrací, dvě teplotní čidla monitorující kondici podpůrných ložisek a snímač AE. Všechny tyto průběhy jsou ukládány a archivovány pro následné zpracování naměřených signálů.

Naměřená data z akcelerometrů jsou primární pro ukončování zkoušek. Ukázalo se, že použité akcelerometry jsou natolik citlivé, že dokážou zaznamenat i prvotní výskyt povrchového poškození. Z několika zkoušek bylo možné vysledovat, že při prvotním výskytu povrchových vad došlo k prudkému nárůstu vibrací a tím jde bezpečně určit konec zkoušky. Měření teploty je zejména bezpečnostní ochrana. V případě dosažení vysoké teploty je nutné zkoušku zastavit, aby se zabránilo samovznícení použitého maziva nebo jiného poškození stanice. Zároveň snímače teploty slouží pro jednoduchou diagnostiku opěrných ložisek, která v současné době není možné diagnostikovat jiným způsobem.

Snímání signálu AE je pouze doplňkové, protože se předpokládalo, že snímače dokážou zaznamenat rozvoj kontaktní únavy materiálu na zkušebním vzorku. Tento předpoklad byl zatím potvrzen jen z části. Primárním problémem je velký útlum elastických vln ze zkušebního vzorku. Snímač AE není možné umístit na jiné místo. Vznikající elastické vlny musí projít přes 5 rozhraní, přičemž každé utlumí signál jinak. Jako nejproblematictější rozhraní bylo vybráno rozhraní mezi vnějším kroužkem opěrného ložiska a ložiskovým pouzdrem. Ložisko není do pouzdra lisováno, aby se zajistila snadná demontáž zkušebního vzorku. Toto ložisko je zatěžováno jen minimálními radiálními silami, takže dochází k velice špatné vazbě mezi ložiskem a pouzdrem. Možné řešení je využít speciálního vlnovodu, který by byl pevně spojen s vnějším kroužkem ložiska, to by zajistilo lepší vazbu, než která je aktuálně využívána.

Snímání signálu AE bylo aplikováno i na strojích Axmat, které jsou také součástí laboratoře kontaktní únavy na Ústavu konstruování FSI, VUT v Brně. Měření AE na těchto stanicích vykazuje velice dobré výsledky. Princip průběhu zkoušek na stanicích Axmat je jiný, než na stanicích R-mat. Hlavním rozdílem je, že mezi zkušebním tělesem a snímačem AE jsou pouze dvě rozhraní a jedno rozhraní je zatíženo axiální silou. V případě snížení počtu rozhraní mezi zkušebním vzorkem a snímačem AE na stanicích R-mat, může být dosaženo lepších výsledků.

Zároveň experiment pro výběr vhodného snímače AE ukázal značné rozdíly mezi jednotlivými snímači. Je pravděpodobné, že mohou existovat ještě lepší snímače, který by dokázaly zachytit daleko více událostí ze zkušebního vzorku. V kombinaci s dříve zmiňovaným vlnovodem, by bylo jednodušší se přiblížit k původnímu předpokladu.

Kromě výměny elektronických částí probíhala údržba i na mechanických částech jednotlivých stanic. Na stanicích byly vyměněny poškozené klínové řemeny a rozvody maziva. Všechny rekonstruované stanice byly vyčištěny od starého rozstříkaného oleje a nově nastříkány, aby se stanice barevně sjednotily. Dvě stanice disponovaly starými a nepraktickými kryty zabraňujícími rozstříku maziva, proto musely být navrženy a vyrobeny nové kryty. Také byla vyrobena nová ložisková pouzdra, která dovolují montáž snímačů AE a teplotních čidel. Akcelerometry byly přišroubovány přímo do konstrukce držáku zkušebního vzorku.

Pro správnou funkci zkušebních stanic bylo nezbytné provést úpravy v řídicím softwaru. Bylo nutné přidat nové funkce, jako je upozornění na opotřebení podpěrného ložiska a ukončování zkoušky s časovou prodlevou po překročení nastavené limitní hodnoty vibrací. Byly přidány nové veličiny, které se zobrazují a zadávají do virtuálního ovládacího panelu. Při zkušebních experimentech se objevilo několik nedostatků, které byly také opraveny, aby byl řídicí systém co nejlépe použitelný pro obsluhu.

Z konceptů a samotných experimentů vyplynulo, že by bylo žádoucí v řídicím softwaru zpracovávat signál z akcelerometrů v jeho frekvenční oblasti. Ze znalosti nejvíce zastoupené frekvence v signálu, by bylo možné konkrétně určit, která součást vibrace generuje. Tímto způsobem by bylo možné zajistit orientační ale rozsáhlou diagnostiku celé zkušební stanice R-mat. Toto zpracovávání signálu se nepodařilo, a to z toho důvodu, že je signál nutné zpracovávat přímo v PLC. K naprogramování těchto funkcí již nejsou dostatečné základní znalosti z programování PLC. Také k daným modulům a funkcím není dostatečně podrobná dokumentace.

Komplikace ve frekvenčním zpracování signálu vibrací ztížila zejména diagnostikování povrchových vad na přítlačných discích a diagnostiku opotřebovaných ložisek. Tuto diagnostiku je možné provést provizorně pomocí softwaru ZDaemon pro záznam AE. Jednou za půl hodiny je zaznamenáván krátký kontinuální signál AE. Tento kontinuální signál jde následně zobrazit a podle jednotlivých rázů v signálu jde jednoduše identifikovat poškozený přítlačný disk. Frekvenční zpracování tohoto signálu nemá smysl, protože signál je filtrován horní propustí 50 kHz, což znemožní zjištění nízkých frekvencí pomocí FFT. Přítlačné disky se otáčejí frekvencí 10 až 17 Hz v závislosti na stanici.

Z průběhu několika zkoušek se lze pouze domnívat, že poškozené přítlačné disky a opěrná ložiska jde diagnostikovat taktéž pomocí měřených vibrací. Nízké a pozvolné zvýšení RMS zrychlení může značit poškozený přítlačný disk, kolísání signálu může diagnostikovat opotřebované ložisko a prudký nárůst RMS zrychlení značí povrchové vady na zkušební vzorku. Kvůli časové náročnosti zkoušek nemohlo být provedeno více experimentů, které by potvrdily nebo vyvrátily tyto domněnky.

Upozornění na opotřebování opěrných ložisek bylo zrealizováno pomocí principů termografie. Tato metoda není nejvhodněji zvolena, protože ložiska nejsou nepřenaší téměř žádné zatížení a jsou kontinuálně mazána a mazivem chlazená. Z tohoto důvodu by bylo vhodné diagnostiku doplnit právě o zpracovávání signálu vibrací ve frekvenční oblasti. Bylo by možné přesně diagnostikovat, že došlo k opotřebování ložiska, a měření teplot by pouze doplnilo, o které ložisko se jedná.

Vyhodnocování zkoušek je zajištěno pomocí skriptu pro software Matlab. Skript je koncipován uživatelsky co nejjednodušeji. Všechny vstupní parametry jsou zadávány, případně vybírány, pomocí interaktivních dialogových oken. Ke správnému vyhodnocení zkoušky je nutné vybrat soubory s naměřenými daty a vyplnit parametry zkoušky. Skript již sám oba měřené signály časově synchronizuje, na základě časové známky. Je kontrolován rozdíl teplot a v případě výrazného rozdílu je obsluha u výsledku vyhodnocení informována. Signály jsou dále zpracovávány a zejména jsou vykresleny grafy s průběhy jednotlivých signálů závislých na vykonaných otáčkách zkušební vzorku. V grafu je taktéž označeno místo, kde došlo ke kontaktnímu poškození materiálu. Výsledkem vyhodnocení jsou právě vykreslené grafy s průběhy a okno se souhrnem informací o zkoušce

Pro vyhodnocení okamžiku, kdy došlo k výskytu první vady na zkušební vzorku byla zvolena metoda maximálního nárůstu signálu. Tato metoda se zdála jako nejvhodnější pro všechny zkoušky, které byly provedeny. Kvůli časové náročnosti a omezenému přístupu do laboratoří nebylo provedeno více měření, ze kterých by mohla vyplynout jiná, vhodná, metoda. Například určení rozvoje poškození na základě zvýšení hodnoty RMS o určité procenta nad ustálenou hodnotu.

Funkčnost modernizovaných stanic byla ověřována provedením zkoušky kontaktní únavy materiálu a také dílčími experimenty, které sloužily pro zpřesnění parametrů řídicího softwaru. Z časové náročnosti únavových zkoušek, některé dílčí experimenty nebyly testovány na celé zkoušce, byl proveden jen základní PenTest, aby bylo možné ověřit odezvu testu na snímače AE.

Ke stanicím R-mat byl vytvořen návod k použití, který je součástí přílohy č.4.

Rekonstrukce zkušebních stanic R-mat byla financována z prostředků projektu TAČR (TH 02010306 – Výzkum a vývoj konstrukce a technologie nové generace axiálních soudečkových ložisek). Celkové náklady na rekonstrukci činily zhruba 75 tis. Kč. Téměř celá suma byla vynaložena za rekonstrukci elektroniky, nový rozvaděč, PLC a potřebné snímače a moduly k PLC. Náklady na modernizaci pohledových částí činily asi 4 tis. Kč.

7 ZÁVĚR

Hlavního cíle této práce bylo dosaženo. Zkušební stanice R-mat byly rekonstruovány, byla modernizována zejména řídicí elektronika, která dovoluje využívání moderních snímačů a zajišťuje automatické měření, které není závislé na zkušenostech obsluhy, což bylo největším nedostatkem původních stanic. Průběhy všech měřených signálů jsou ukládány a archivovány pro zpětné vyhodnocování zkoušek.

Dílní cíle byly také splněny. Bylo navrženo a vyrobeno nové ložiskové pouzdro, které dovoluje instalovat nově použité snímače. Pomocí experimentů byly zpřesněny parametry pro řízení a taktéž byla ověřena funkčnost celé stanice R-mat. Řídicí systém je schopný orientačně upozornit na poškozené podpěrné ložisko. Analýzou kontinuálního signálu AE je možné diagnostikovat poškozené přítlačné disky. Při experimentech se objevily nedostatky v řídicím softwaru pro PLC, systém byl upraven tak, aby byl plně funkční pro danou aplikaci a splňoval všechny požadavky. Byl vytvořen vyhodnocovací software, který časově synchronizuje importované průběhy měřených signálů a následně vyhodnotí počet otáček, které zkušební vzorek vykonal.

Pro ovládání rekonstruovaných stanic byl vytvořen návod k obsluze, podle kterého může zařízení obsluhovat i obsluha bez dřívějších zkušeností s tímto typem zkoušek.

Stanice R-mat mohou být i nadále využívány v laboratořích kontaktní únavy na Ústavu konstruování FSI, VUT v Brně pro zkoušky kontaktní únavy materiálu, o které je stále z průmyslu zájem. Na stanicích mohou být v budoucnu testovány zcela nové vyhodnocovací metody, které budou schopny identifikovat jednotlivá stádia rozvoje kontaktního poškození materiálu.

Z práce vyplynulo, že by bylo vhodné zpracovávat signál vibrací v jeho frekvenčním spektru přímo v PLC. V další navazující práci (bc, mgr) by bylo vhodné doplnit frekvenční zpracování signálu, případně aplikování navrhovaného vlnovodu, které by s využitím dosavadních metod dokázalo plně diagnostikovat všechny rušivé vlivy, které ovlivňují zkoušky.

Souhrn výsledků bude předán k publikování na 51. mezinárodní konferenci Defektoskopie 2021, která se bude konat v rámci European NDT&CM 2021 v Praze.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LASEK, S. *Základy degračních procesů: učební text*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-3373-6.
- [2] FAMFULÍK, J. a J. MÍKOVÁ. *Teorie údržby*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1509-1.
- [3] MPR. [online] [vid. 23. březen 2020]. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/product/mpr/>
- [4] LTD, Phoenix Tribology. RCF 3. [online] [vid. 23. březen 2020]. Dostupné z: <http://www.phoenix-tribology.com/at2/leaflet/rcf3>
- [5] LTD, Phoenix Tribology. RCF 2. 2017 [online] [vid. 30. duben 2021]. Dostupné z: <http://www.phoenix-tribology.com/at2/leaflet/rcf2>
- [6] *Indian Institute of Technology Palakkad*. [online] [vid. 23. březen 2020]. Dostupné z: <https://icsr.iitpkd.ac.in/node/458>
- [7] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. *Technická diagnostika*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [8] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [9] YOSHIOKA, T. a T. FUJIVARA. Acoustic emission and vibration in the process of rolling-contact fatigue. *JOURNAL OF JAPANESE SOCIETY OF TRIBOLOGISTS*. 1989, roč. 34, č. 1, s. 36–42.
- [10] GUO-LU, Li. a Z. ZHI-QIANG, Wang HAI-DOU, Xu BIN-SHI, Piao ZHONG-YU a Zhu LI-NA. Acoustic emission monitoring and failure mechanism analysis of rolling contact fatigue for Fe-based alloy coating. *Tribology International*. 2013. ISSN 0301679X.
- [11] ELFORJANI, M. a D. MBA. Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in a slow speed rolling element bearing with acoustic emission. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*. 2008, roč. 130, č. 4. ISSN 10489002.
- [12] POPELKA, J. *Vliv cílené modifikace topografie na únavové poškození třecích povrchů*. B.m., 2008. Jakub Popelka Vysoké učení technické v Brně. Ústav konstruování. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/25262>
- [13] LÖHR, M., D. SPALTMANN, S. BINKOWSKI, E. SANTNER a M. WOYDT. In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction. *Wear*. 2006, roč. 260, č. 4–5, s. 469–478. ISSN 00431648.
- [14] RAHMAN, Z. a H. OHBA, Takeo YOSHIOKA a Takashi YAMAMOTO. Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission. *Tribology International*. 2009, roč. 42, č. 6, s. 807–815. ISSN 0301679X.
- [15] GUO, Y. B. a D. W. SCHWACH. An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique. *International Journal of Fatigue*. 2005, roč. 27, č. 9, s. 1051–1061. ISSN 01421123.

- [16] *FujiCera*. [online] [vid. 19. březen 2020]. Dostupné z: http://www.fujicera.co.jp/managed/wp-content/themes/fujicera/digitalbook/en/ae/index_h5.html#2
- [17] BRECKENRIDGE, F. R. a M. GREENSPAN. Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1981, roč. 69, č. 4, s. 1177–1185. ISSN 0001-4966.
- [18] ENOKI, M., M. WATANABE, P. CHIVAVIBUL a T. KISHI. Non-contact measurement of acoustic emission in materials by laser interferometry. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2000, roč. 1, č. 3, s. 157–165. ISSN 1468-6996.
- [19] KEPRT, J. *Primární kalibrace snímačů akustické emise*. B.m., 2009. b.n.
- [20] GROSSE, Ch. *Hsu-Nielsen source*. 2002 [online] [vid. 13. březen 2020]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/ndtaz/ndtaz.php>
- [21] SCHREIER, J. *Vliv parametrů vazebného média a struktury povrchu na kvalitu snímaného signálu akustické emise*. B.m., 2012. Vysoké učení technické Brno.
- [22] BANČÁK, M. *Snímání signálu akustické emise s využitím vlnovodů*. B.m., 2015. b.n. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101703
- [23] SPM. 2020 [online] [vid. 1. květen 2020]. Dostupné z: <https://www.spminstrument.com/measuring-techniques/shock-pulse-monitoring/>
- [24] SPM. Bearing Checker. *Návod k obsluze*. Dostupné z: [https://www.loziska.com/store/spm_-_bearing_checker_\(navod_k_obsluze\).pdf](https://www.loziska.com/store/spm_-_bearing_checker_(navod_k_obsluze).pdf)
- [25] GERGEL, M. *Rekonstrukce stanice AXMAT*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, 2014. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/33233>
- [26] *Online Hertzian Stress Calculator*. 2021 [online] [vid. 16. březen 2021]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/hertz-pressure-calculator/>
- [27] *Pitting*. 2018 [online] [vid. 18. březen 2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Pitting-on-the-inner-ring-surface-of-spherical-roller-bearing_fig1_325363456
- [28] CORPORATION, SKF. *Spalling*. [vid. 18. březen 2020]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/whats-the-difference-between-brinelling-spalling-fretting/>
- [29] *Katalog firmy Dakel*. [vid. 18. březen 2020]. Dostupné z: <https://www.dakel.cz/prod/DAKEL-Transducers-2016-v16.pdf>
- [30] BAYER, R. *Úvod do principů termografie*. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65646

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AE – Acoustic emission – akustická emise

EHD – Elastohydrodynamický režim mazání

FFT – Fast Fourier transform – rychlá Furierova transformace

PLC – Programmable logic controller – programovatelný logický automat

RMS – Root mean square – efektivní hodnota signálu

SPM – Shock pulse metod – metoda rázových pulzů

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Původní zkušební stroj R-mat s osazeným snímačem akustické emise	16
Obr. 2-1 a) pitting na vnitřním kroužku radiálního ložiska [27]; b) postupně se rozvíjející spalling [28]	17
Obr. 2-2 a) stroj MPR [3]; b) uložení zkušební vzorku mezi třemi válci ve stroji MPR [3]	18
Obr. 2-3 Zkušební stroj RCF 3 [4]	19
Obr. 2-4 Schéma uložení zkušebních vzorků ve stroji RCF 2 [5]	19
Obr. 2-5 Zkušební stroj technologické instituce v Indii [6].....	20
Obr. 2-6 Piezoelektrický snímač s uspořádáním DELTA [7]	22
Obr. 2-7 Amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrického akcelerometru [7]...	23
Obr. 2-8 Odezva signálu AE na hit [8].....	24
Obr. 2-9 a) praskavý signál AE - časově výrazně oddělené hity AE [8]; b) spojitý signál AE - signál hitů se sčítá/superponuje [8].....	25
Obr. 2-10 Graf porovnávací akustickou emisi s vibrodiagnostikou na diagnostice axiálního ložiska [11]	26
Obr. 2-11 Piezoelektrický snímač AE [16] a) rezonanční; b) širokopásmový	28
Obr. 2-12 Schéma PenTestu [7]	29
Obr. 2-13 Typy vlnodů firmy Dakel [29].....	30
Obr. 2-14 Zbývající životnost ložisek dle metody SPM [24]	32
Obr. 2-15 Termogram: ložisko motoru se poměrně zahřívá [30].....	33
Obr. 2-16 Zkušební vzorek mezi přítlačnými disky	34
Obr. 2-17 Schéma funkce zkušebního zařízení R-mat.....	35
Obr. 2-18 Zkušební stroje; a) renovovaný stroj osazený senzorem AE, b) upravený stroj pro pohánění obou disků.....	36
Obr. 2-19 Měřicí a vyhodnocovací řetězec původního zařízení.....	37
Obr. 2-20 a) rozvaděčová skříň; b) karty vyhodnocující vibrace; c) ovládání konkrétního zkušebního stroje	38
Obr. 4-1 Měřicí řetězec pro variantu se dvěma snímači AE.....	49
Obr. 4-2 Měřicí řetězec pro variantu se dvěma snímači teploty.....	49
Obr. 4-3 Měřicí řetězec s FFT filtrací	50

Obr. 5-1 Původní uložení vzorku	52
Obr. 5-2 Umístění snímačů	52
Obr. 5-3 Schéma funkce modernizované stanice R-mat.....	53
Obr. 5-4 Vývojový diagram vyhodnocování zkoušek.....	54
Obr. 5-5 Měřicí řetězec modernizované stanice	54
Obr. 5-6 Testované snímače AE (zleva číslo 1 až 6)	55
Obr. 5-7 Měření amplitudy pulzu.....	55
Obr. 5-8 Princip zkoušky porovnání útlumu.....	56
Obr. 5-9 a) původní stav; b) nově nastříkaná stanice	57
Obr. 5-10 Rozvod maziva: a) původní stav; b) současný stav.....	58
Obr. 5-11 Spojování dílů krytu	59
Obr. 5-12 Zakrytovaná modernizovaná stanice.....	59
Obr. 5-13 Graf rozdílů derivací teploty 1. a 2. snímače	60
Obr. 5-14 Původní vzhled ovládacího panelu	61
Obr. 5-15 Aktuální vzhled virtuálního ovládacího panelu	62
Obr. 5-16 Dialogové okno pro výběr cesty k souboru.....	63
Obr. 5-17 Vykreslení grafů ze zkoušky	64
Obr. 5-18 Záznam z dlouhodobé zkoušky	65
Obr. 5-19 Průběh ze zkoušky kontaktní únavy materiálu	66
Obr. 5-20 Pitting na zkušebním vzorku	66
Obr. 5-21 Průběh experimentu s opotřebeným ložiskem.....	67
Obr. 5-22 Průběh zkoušky s poškozeným přítláčným diskem.....	68
Obr. 5-23 Kontinuální záznam AE při poškození disku: a) před poškozením; b) po poškození	69

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technické specifikace modernizovaného zařízení	42
Tab. 2 Porovnání snímačů AE 5.4	57

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výkresová dokumentace pro výrobu ložiskových pouzder

Příloha 2: Výkres sestavení a digitální data pro výrobu krytu stanice

Příloha 3: Skript pro vyhodnocování zkoušek v softwaru Matlab

Příloha 4: Návod k obsluze stanic R-mat